

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Елизаров С. И., Куприянов М. С. Проблема определения количества кластеров при использовании методов разбиения ..... 3
- Алексеев С. А. Формирование общего информационного ресурса в корпоративной сети социальной организационно-технической системы ..... 8
- Свиньин С. Ф., Хаймина Л. Э., Латухина Е. А., Попов А. И. Медицинская информационно-измерительная система функциональной диагностики ..... 11

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Кондрашов А. С. Определение допусков на элементы САУ при технической реализации законов управления ..... 17
- Александров А. А. Оптимизация динамики летательного аппарата по различным критериям ..... 21

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Бессмертный И. А. Методы поиска информации с использованием интеллектуального агента ..... 26
- Немолочнов О. Ф., Зыков А. Г., Кулагин В. С., Осовецкий Л. Г., Поляков В. И., Суханов А. В. Метод обнаружения недеklarированных возможностей и значений *don't care* вычислительного процесса ..... 32

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Водовозов А. М., Елюков А. С. Помехозащищенные алгоритмы параметрической идентификации электромеханических систем ..... 40
- Анкудинов К. А., Анкудинов А. И., Акиншин Н. С., Глаголев О. А., Емельянов А. В., Мануйлов В. В. Способ измерения постоянной времени электропривода ..... 43
- Медведев А. В., Чулков В. А. Кольцевые генераторы импульсов на ПЛИС ..... 50

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Сушков А. Л. Параметры сфероконцентрического распределения показателя преломления в сферической и прямоугольной системах координат ..... 54
- Страхов С. Ю. Применение комплексных критериев эффективности при разработке и эксплуатации лазеров ..... 61
- Лопатина П. С., Криштоп В. В. Электрооптический модулятор для волоконно-оптических линий связи ..... 67

- SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича) ..... 72

- УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ в 2009 г. .... 77

# CONTENTS

## INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

<b>Elizarov S. I., Kupriyanov M. S.</b> Cluster Number Estimation Problem in Partition Methods.....	3
<b>Alekseev S. A.</b> Creation of a Common Informational Resource of Corporate Network in Social Organizational-Technical System.....	8
<b>Svinyin S. F., Khaymina L. E., Latukhina E. A., Popov A. I.</b> Medical Data-Measuring System for Functional Diagnostics.....	11

## DEVICES AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

<b>Kondrashov A. S.</b> Estimation of Tolerances on Components in Technical Realization of Control Laws.....	17
<b>Alexandrov A. A.</b> Optimization of Flying Vehicle Dynamics with Different Criteria.....	21

## COMPUTING TECHNIQUE

<b>Bessmertny I. A.</b> An intellectual Agent for Semantic Web.....	26
<b>Nemolochnov O. F., Zykov A. G., Kulagin V. S., Osovetsky L. G., Polyakov V. I., Sukhanov A. V.</b> A Method to Reveal Undeclared Performance Capabilities and Values “Don’t Care” of a Calculation Procedure.....	32

## ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

<b>Vodovozov A. M., Elyukov A. S.</b> Algorithms of Parametrical Identification of Electromechanical Systems Protected Against Hindrance.....	40
<b>Ankudinov K. A., Ankudinov A. I., Akinshin N. S., Glagolev O. A., Emelyanov A. V., Manuilov V. V.</b> Technique for Measuring the Time Constant of Electric Drive.....	43
<b>Medvedev A. V., Chulkov V. A.</b> Circular Generator on Programmable Logical Integrated Chip.....	50

## OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

<b>Sushkov A. L.</b> Parameters of Spherically Symmetric Distribution of Refractive Index in Spherical and Cartesian Coordinate Systems.....	54
<b>Strakhov S. Yu.</b> Application of Integrated Criteria of Efficiency in Lasers Development and Exploitation.....	61
<b>Lopatina P. S., Krishtop V. V.</b> Electro-Optical Modulator for Fiber Optic Communication Line.....	67

SUMMARY.....	72
--------------	----

THE LIST of ARTICLES PUBLISHED in 2009.....	77
---------------------------------------------	----

*Editor-in-Chief E. B. Yakovlev*

С. И. ЕЛИЗАРОВ, М. С. КУПРИЯНОВ

## ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА КЛАСТЕРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДОВ РАЗБИЕНИЯ

Обсуждается проблема определения оптимального количества кластеров в методах разбиения. Рассматривается ряд известных критериев, используемых для центроидных методов: коэффициент разбиения, энтропия разбиения и эффективность разбиения. Предложены два новых критерия — для центроидного и нецентроидного методов: модифицированный коэффициент разбиения и качество разбиения.

*Ключевые слова:* кластеризация, методы разбиения, нечеткое отношение эквивалентности, критерий качества решения, коэффициент разбиения, энтропия разбиения.

**Методы решения задачи кластеризации.** Задача кластеризации заключается в разбиении исследуемого множества объектов на группы, называемые кластерами, и решается в рамках первичного анализа данных. Среди ряда проблем, возникающих в ходе решения (выбор исходных признаков, выбор метода кластеризации, интерпретация результатов и др.), основной является проблема определения количества кластеров. Формально задача кластеризации описана в работе [1].

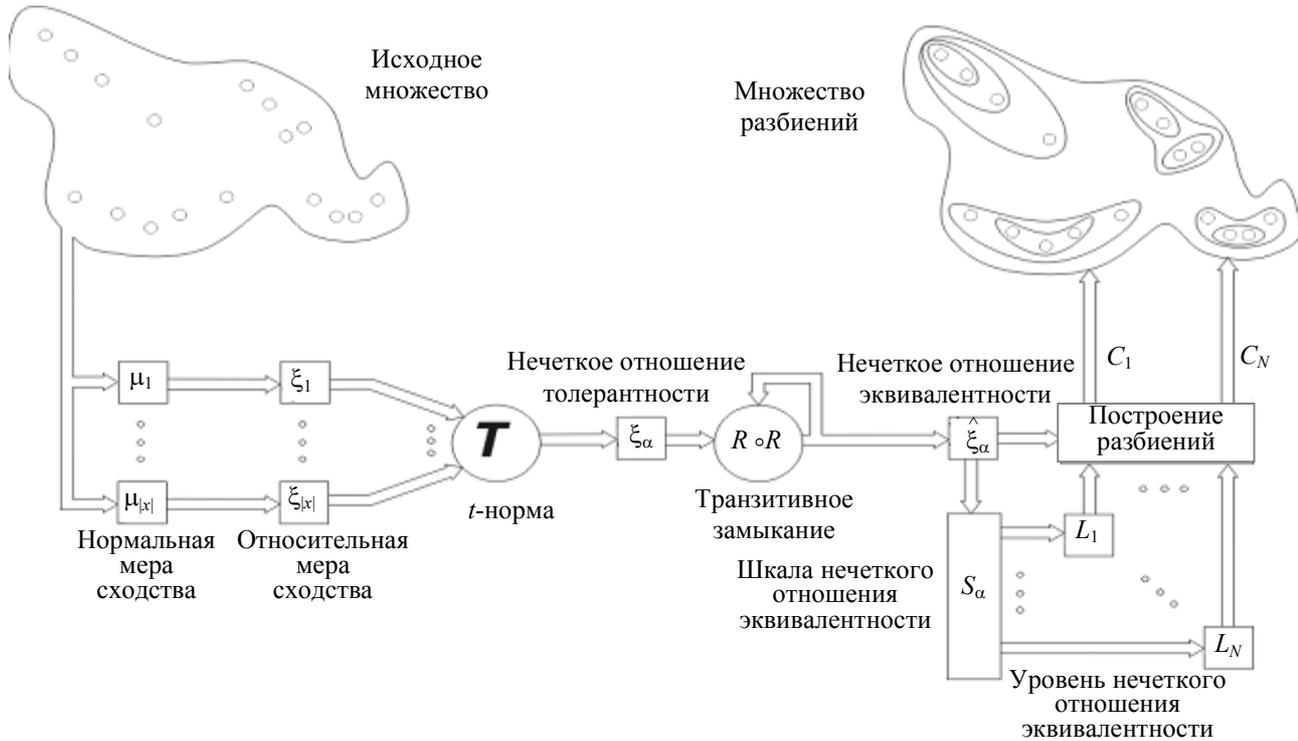
При решении задачи кластеризации наибольшее распространение получили методы построения разбиения, при использовании которых данные группируются в кластеры таким образом, чтобы целевая функция алгоритма разбиения достигала экстремума [2, 3]. Методы построения разбиения можно разделить на центроидные и нецентроидные. В центроидных методах вводится понятие центра кластера (центроида) — особой точки, вокруг которой формируется кластер. В большинстве практических приложений центроидные методы построения разбиения позволяют успешно решать задачу кластеризации. Однако эти методы имеют ряд общих недостатков, а именно:

— предполагается, что кластеры имеют форму эллипсоида: это далеко не всегда справедливо;

— в каждом кластере предполагается наличие некоторой узловой точки (центра кластера, центроида), степень принадлежности которой кластеру равна единице; степень принадлежности всех остальных точек данному кластеру меньше единицы и убывает по мере удаления точки от центра; при кластеризации данных со сложной внутренней структурой такое предположение о центре кластера не всегда приемлемо;

— построение кластеров на базе отношений между элементами входного множества и центрами кластеров, а не на базе отношений между самими элементами сужает круг возможных решений задачи кластеризации; существуют задачи, для которых верное решение при таком подходе вообще не может быть найдено.

Метод кластеризации на базе нечеткого отношения эквивалентности [4] предназначен для устранения недостатков, присущих центроидным методам. В данном методе на основе определения расстояния между каждой парой элементов входного множества строится сначала нечеткое отношение толерантности, затем при помощи транзитивного замыкания этого отношения получается нечеткое отношение эквивалентности, которое характеризуется шкалой уровней эквивалентности. Каждый из этих уровней соответствует некоторому отношению эквивалентности в классическом смысле. Схема кластеризации с использованием нечеткого отношения эквивалентности показана на рисунке [1].



К достоинствам метода можно отнести отказ от использования понятия центра кластера (решение задачи кластеризации находится исключительно при помощи отношений сходства между элементами входного множества), а также возможность поиска кластеров произвольной формы. Недостатком метода является чувствительность к шуму. Метод нечеткого отношения эквивалентности отличается от центроидных методов способом представления результатов (в виде матрицы нечеткого отношения эквивалентности).

Главный недостаток как центроидных, так и нецентроидных методов кластеризации заключается в необходимости указывать количество кластеров, на которое производится разбиение. Определение количества кластеров при решении задачи кластеризации обычно выводится за рамки задачи. Предполагается, что такая информация уже имеется к моменту начала ее решения. С другой стороны, даже при наличии некоторой информации о возможном количестве кластеров она, как правило, выражается не единственным числом, а интервалом. Для каждого допустимого количества кластеров находится соответствующее разбиение. Определить, какое разбиение является наиболее верным, довольно сложно. Отсюда можно сделать вывод, что выбор оптимального количества кластеров и выбор наилучшего решения задачи кластеризации из множества возможных — это две грани одной и той же проблемы. Чтобы решить эту проблему вводятся понятия критериев оценки качества решения [4, 5]. Использование этих критериев позволяет решить задачу определения количества кластеров и выбрать оптимальное решение.

**Критерии оценки качества решения задачи кластеризации.** Рассмотрим некоторые критерии, используемые для центроидных методов построения разбиения.

Коэффициент разбиения определяется как

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^{|X|} \sum_{j=1}^{|C|} u_{ij}^2}{|X|}, \quad (1)$$

где  $u_{ij}$  — элемент матрицы принадлежности,  $X$  — входное множество,  $C$  — множество кластеров.

Как видно из формулы (1), единственным аргументом данного критерия является матрица принадлежности.

Из определения функции принадлежности известно, что

$$u_{ij} \in [0, 1], \quad \sum_{j=1}^{|C|} u_{ij} = 1. \quad (2)$$

Учитывая это, несложно показать, что данный критерий достигает минимума при всех  $u_{ij} = |C|^{-1}$ ,  $j = 1, \dots, |C|$ , и равен при этом  $|C|^{-1}$ . Это случай наибольшей неопределенности: все элементы входного множества с равной степенью принадлежат каждому из кластеров. Максимум данного критерия достигается на границе области определения ( $u_{ip} = 1$ ,  $u_{iq} = 0$ ,  $p, q = 1, \dots, |C|$ ,  $p \neq q$ ), при этом критерий равен единице, что соответствует максимально четкому разбиению.

*Модифицированный коэффициент разбиения.* При применении коэффициента разбиения отмечено, что при малом количестве кластеров данный критерий не позволяет определить наилучшие разбиения. Очевидно, это связано с областью его значений. Не меняя характера критерия, изменим его таким образом, чтобы зависимость от количества кластеров не была связана с началом диапазона значений критерия. Для этого вычтем из коэффициента разбиения величину  $|C|^{-1}$ . В результате получим модифицированный коэффициент разбиения

$$K_{p.m} = \frac{\sum_{i=1}^{|X|} \sum_{j=1}^{|C|} u_{ij}^2}{|X|} - \frac{1}{|C|},$$

область значений которого будет находиться на отрезке  $[0, (|C| - 1)/|C|]$ . Применение модифицированного коэффициента разбиения дает более объективные результаты.

И коэффициент разбиения, и его модификации имеют неустранимый недостаток, связанный с оценкой разбиений при разном количестве кластеров, — области значений критериев напрямую зависят от выбранного количества кластеров, что ограничивает применение этих критериев.

Другой критерий — *энтропия разбиения* — определяется следующим выражением:

$$E_p = - \frac{\sum_{i=1}^{|X|} \sum_{j=1}^{|C|} u_{ij} \ln(u_{ij})}{|X|}.$$

Данный критерий строится по аналогии с определением, принятым в теории информации [6]. Определим, какие значения принимает этот критерий, учитывая выражение (2). Несложно показать, что он достигает максимума при всех  $u_{ij} = |C|^{-1}$ ,  $j = 1, \dots, |C|$ , и равен при этом  $\ln |C|$ ; это соответствует наихудшему по информативности случаю: все значения функций принадлежности одинаковы. Минимальное значение данного критерия (равное нулю) будет получено в случае, если для каждого элемента входного множества найден кластер, принадлежность к которому равна единице, что соответствует четкому разбиению. Таким

образом, чем меньше значение данного критерия, тем более четкое разбиение будет получено. Тем не менее сравнивать при помощи данного критерия кластеризации, полученные при разном количестве кластеров, некорректно, поскольку диапазон его значений для каждой кластеризации будет разным.

*Модифицированная энтропия*, определяемая выражением

$$E_{p.m} = - \frac{\sum_{i=1}^{|X|} \sum_{j=1}^{|C|} u_{ij} \ln(u_{ij})}{|X| \ln |C|} = \frac{E_p}{\ln |C|},$$

лишена недостатков предыдущего критерия. Как видно, диапазон значений модифицированной энтропии не связан с количеством кластеров и лежит в отрезке  $[0,1]$ . В этом случае можно сравнивать результаты, полученные с использованием разного количества кластеров.

Следующий критерий — *эффективность разбиения* — определяется выражением

$$I_p = \sum_{j=1}^{|C|} \sum_{i=1}^{|X|} u_{ij}^2 \left( d^2(k_j, \bar{x}) - d^2(x_i, k_j) \right),$$

где  $\bar{x}$  — среднее значение элементов входного множества,  $k_j$  — центр кластера  $j$ ,  $d(x,y)$  — расстояние между  $x$  и  $y$ .

Данный критерий состоит из двух частей:

— межкластерные отличия

$$\sum_{j=1}^{|C|} \sum_{i=1}^{|X|} u_{ij}^2 d^2(k_j, \bar{x});$$

— внутрикластерные отличия

$$\sum_{j=1}^{|C|} \sum_{i=1}^{|X|} u_{ij}^2 d^2(x_i, k_j).$$

Получаем, что чем больше значения критерия, тем лучше выполнена кластеризация. Недостаток данного критерия заключается в том, что его значения выражены в абсолютных величинах (в единицах расстояния) и могут в общем случае быть произвольными, что усложняет интерпретацию: затруднительно сравнивать кластеризации, выполненные при различных наборах данных, даже если они взяты из одного множества.

Рассмотрим *критерий*, используемый для *метода нечеткого отношения эквивалентности*, — *качество разбиения*. При использовании нечеткого отношения эквивалентности для решения задачи кластеризации результатами являются матрица нечеткого отношения эквивалентности и шкала уровней эквивалентности. Каждый уровень шкалы порождает соответствующее разбиение на классы эквивалентности. Количество уровней в шкале эквивалентности велико и близко к мощности исследуемого множества. Значит, именно такое число различных решений можно получить, но не все они являются практически полезными.

При увеличении уровня эквивалентности новое разбиение на классы получается из предыдущего путем разделения одного или нескольких классов. Как правило, классы эквивалентности значительно различаются по мощности (особенно в первой половине шкалы отношения). Группу наиболее мощных классов назовем *практически полезными кластерами*. Данную группу необходимо уметь выделять из множества классов эквивалентности.

Пусть  $C = \{c_1, \dots, c_n\}$  — множество всех классов эквивалентности, полученных для данного уровня эквивалентности,  $C_c \subseteq C$  — множество всех практически полезных кластеров. Необходимо определить минимальную мощность  $N$  класса эквивалентности, при которой его

можно считать практически полезным кластером. В этом случае  $C_c = \{\forall c_i \in C: |c_i| \geq N\}$ . Для определения  $N$  предлагается следующая процедура:

- классы эквивалентности распределяются по убыванию мощности;
- для каждой пары упорядоченных классов вычисляется взвешенное отношение

$$R = \frac{|c_i|}{|c_{i+1}|} \cdot \frac{|c_i| + |c_{i+1}|}{2},$$

где первый множитель — отношение двух соседних по мощности классов, а второй — весовой коэффициент, назначение которого (при  $c_i = c_{i+1}$ ) — сместить максимум отношения  $R$  ближе к началу последовательности;

— по максимуму  $R$  определяется элемент в упорядоченной последовательности классов; его мощность будет равна  $N$ .

Реализуя описанную выше процедуру, для каждого разбиения на классы эквивалентности можно выделить группу практически полезных кластеров, что является важной составляющей решения задачи кластеризации. Другая числовая характеристика разбиения — коэффициент разбиения: отношение суммарной мощности кластеров к общей мощности множества.

Итак, для каждого результата кластеризации определены:

- уровень эквивалентности: чем он выше, тем более схожи элементы классов эквивалентности, тем более качественным будет разбиение;
- множество практически полезных кластеров: чем их больше, тем лучше;
- коэффициент разбиения: чем он больше, тем качественнее разбиение.

В общем случае по мере увеличения уровня эквивалентности множество практически полезных кластеров увеличивается, но уменьшается коэффициент разбиения. Исходя из этого можно сформировать критерий наилучшего разбиения: наилучшим назовем такое разбиение, для которого показатель качества разбиения

$$Q_i = L_i \cdot |C_c| \cdot \frac{\sum_{c_j \in C_c} |c_j|}{|X|}$$

достигает максимума; здесь  $L_i$  — уровень эквивалентности,  $C_c = \{c_j\}$ .

Формула для определения показателя качества разбиения, как и процедура получения практически полезных кластеров выведена эмпирическим путем и на основании общих соображений о том, какое разбиение является полезным и наиболее качественным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод. СПб.: БХВ-Петербург, 2004.
2. Miyamoto S., Ichihashi H., Honda K. Algorithms for Fuzzy Clustering: Methods in C-Means Clustering with Applications. Berlin: Springer, 2008.
3. Jang J.-S.R., Sun C.-T., Mizutani E. Neuro-Fuzzy and Soft Computing. A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. New Jersey: Prentice Hall, 1997.
4. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод. СПб.: БХВ-Петербург, 2007.
5. Зайченко Я. П. Самообучение в интеллектуальных системах. Постановка задачи кластер-анализа. Критерии и метрики кластер-анализа [Электронный ресурс]: Основы проектирования интеллектуальных систем / Я. П. Зайченко. 2002: <[http://www.iasa.org.ua/tp\\_r.php?lang=rus&ch=2&sub=4](http://www.iasa.org.ua/tp_r.php?lang=rus&ch=2&sub=4)>.
6. Стратонович Р. Л. Теория информации. М.: Сов. радио, 1975.

- Сергей Иванович Елизаров** — *Сведения об авторах*  
аспирант; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра вычислительной техники;  
E-mail: duplex@rambler.ru
- Михаил Степанович Куприянов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра вычислительной техники; E-mail: Mikhail.kupriyanov@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
вычислительной техники

Поступила в редакцию  
02.06.09 г.

УДК 004.77

С. А. АЛЕКСЕЕВ

## ФОРМИРОВАНИЕ ОБЩЕГО ИНФОРМАЦИОННОГО РЕСУРСА В КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ СОЦИАЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается задача формирования общего информационного ресурса в корпоративной сети социальной организационно-технической системы. Приведены определение, описания ядра и состава общего информационного ресурса, определены цель, технологическая основа, направления и последовательность задачи его формирования.

**Ключевые слова:** *общий информационный ресурс, автоматизированная система управления, корпоративная сеть, социальная организационно-техническая система.*

Современный этап развития автоматизированных систем управления (АСУ) социальными организационно-техническими системами (ОТС) характеризуется повышенной потребностью должностных лиц органов управления, взаимодействующих в рамках корпоративной сети, в актуальной, достоверной, своевременной и всесторонней информации, необходимой для решения задач управления. В этой связи на первый план выходит проблема создания в корпоративной сети общего информационного ресурса, использование которого позволит повысить качество информационных технологий, а следовательно, и качество принимаемых должностными лицами управленческих решений [1—8].

Основной целью создания общего информационного ресурса в корпоративной сети является повышение эффективности функционирования органов управления всех уровней за счет совершенствования информационной поддержки принятия управленческих решений. Удовлетворение информационных потребностей должностных лиц органов управления может быть достигнуто путем концентрации и интеграции актуальной, полной, достоверной и сформированной по единым правилам информации, а также обеспечения ее своевременного представления в соответствии с установленным порядком доступа. Поэтому при формировании общего информационного ресурса корпоративной сети должны выполняться три основных требования:

1) полнота информации, что определяется достаточностью хранящихся данных для решения управленческих задач путем принятия обоснованных решений;

2) эффективность формирования общего информационного ресурса, что предполагает достижение рационального соотношения между затратами на его создание и целевым эффектом, получаемым при его использовании;

3) упорядоченность информации, что регламентируется четким определением общей структуры и систематизацией всех информационных ресурсов.

Из вышесказанного следует, что общий информационный ресурс — это совокупность информационных ресурсов, упорядоченных по единым правилам, и информационно-телекоммуникационных систем и сетей, функционирующих на основе единых принципов, обеспечивающих взаимодействие органов управления корпоративной сети.

Основу общего информационного ресурса корпоративной сети составляют:

- документы, определяющие реализацию процедур принятия управленческих решений (приказы, распоряжения, донесения, сводки и др.);
- нормативные документы (законы, подзаконные акты, нормы, штатные расписания и т.д.);
- справочная и учетная информация (анкеты, картотеки);
- научно-техническая информация;
- информация, циркулирующая в корпоративной сети (базы данных, файлы, сообщения), и другие массивы информации (схемы, плакаты и пр.).

Кроме того, общий информационный ресурс должен содержать:

- организационные структуры, обеспечивающие в рамках корпоративной сети сбор, обработку, хранение, распространение, поиск и передачу информации;
- средства информационного взаимодействия системных специалистов-операторов корпоративной сети (технические, программные, организационные), обеспечивающие доступ должностных лиц к информационным ресурсам на основе реализации соответствующих информационных технологий.

Совокупность организационных структур и средств информационного взаимодействия образует информационную инфраструктуру корпоративной сети социальной организационно-технической системы.

Сложность создания и внедрения общего информационного ресурса корпоративной сети социальной ОТС обусловливается наличием большого количества различных источников и потребителей информации, а также их различным местоположением. Кроме того, для системы управления организациями, имеющими подобную структуру, характерна определенная динамика состава и содержания решаемых задач, возрастание в связи с этим информационных потребностей должностных лиц органов управления, а также большое количество неформализованной (неструктурированной) информации.

Ядром общего информационного ресурса корпоративной сети социальной ОТС должно быть хранилище информации, которое представляет собой многомерные массивы, имеющие одинаковую структуру и содержащие интегрированную совокупность информационных ресурсов, преобразованных (структурированных) по общим правилам хранения. Принципиально такое хранилище может состоять (исходя из структуры организаций, входящих в состав социальной ОТС) из ряда взаимосвязанных хранилищ, ведение и использование которых должно быть автоматизировано с помощью специальных программно-технических средств. Создание ряда взаимосвязанных хранилищ, где могут содержаться данные по различным тематическим областям, позволит наиболее полно и оперативно обеспечить пользователей требуемой информацией. Кроме того, размещение взаимосвязанных хранилищ с учетом уровней системы управления всей социальной ОТС должно обеспечить соответствие информации текущим процессам управления на различных уровнях. Использование и совершенствование хранилищ информации должно базироваться на создании развитой системы обеспечения, которая позволит осуществлять наполнение хранилищ и поиск необходимой информации в рамках корпоративной сети независимо от места ее хранения, а также обеспечить гарантированную защиту информации.

Система обеспечения общего информационного ресурса корпоративной сети социальной ОТС должна включать три основных компонента — три подсистемы, а именно:

— *организационную*, которая представляет собой совокупность органов управления (подразделений, учреждений культуры), осуществляющих сопровождение общего информационного ресурса; такую подсистему необходимо создавать с учетом организационной структуры системы управления подразделениями, входящими в состав социальной ОТС; при этом координацию формирования и совершенствование информационных ресурсов и включение их в общий информационный ресурс целесообразно возложить на специальное информационное подразделение (службу);

— *программную*, которая представляет собой совокупность программных средств, позволяющих осуществить актуализацию информации, ее поиск в хранилищах различного уровня, ее анализ и контроль, а также обеспечить информационную безопасность; при этом данная подсистема должна включать программные средства ведения хранилищ информации, формирования центрального хранилища в месте расположения руководства головной организации, составления рубрикаторов, организации справочно-поисковых систем и др.;

— *техническую*, которая представляет собой комплекс средств вычислительной техники, средств связи, телекоммуникационных систем, средств защиты информации и других систем, необходимых для ведения и использования общего информационного ресурса.

Технологическую основу создания общего информационного ресурса в корпоративной сети социальной организационно-технической системы должны составлять информационные компьютерные технологии, представляющие собой высокопроизводительные, надежные, типовые, информационно-безопасные, технологически независимые лицензионные отечественные аппаратно-программные средства и комплексы. С целью унификации доступа к информации, содержащейся в хранилищах, в рамках корпоративной сети необходимо разработать единую систему протоколов информационного обмена. Такая система может включать протоколы всех уровней взаимодействия и обеспечивать единый унифицированный механизм доступа к хранилищам информации, независимо от используемых технических и программных средств на каждом автоматизированном рабочем месте корпоративной сети.

Работы по формированию общего информационного ресурса следует начинать с комплексного обследования существующей системы управления организациями, входящими в состав социальной ОТС. При этом основное внимание должно быть уделено упорядочению информационных ресурсов, документооборота и обмена информацией между органами управления всех уровней. Следует унифицировать описания информационных ресурсов, что позволит создать условия для их интеграции, удобства их поиска и использования, повышения качества информационного взаимодействия с АСУ различных уровней.

Важнейшим направлением создания общего информационного ресурса корпоративной сети социальной ОТС является разработка унифицированного информационно-лингвистического обеспечения.

Еще одно направление формирования общего информационного ресурса — это развитие (создание) телекоммуникационных систем, позволяющих обеспечивать органам управления (должностным лицам) доступ к соответствующим территориально разделенным информационным ресурсам всех организаций, входящих в состав социальной ОТС. При этом необходимо проведение стандартизации, унификации и сертификации программно-технических средств и телекоммуникационных систем, обеспечивающих работоспособность общего информационного ресурса.

Таким образом, учитывая актуальность рассмотренной задачи и резюмируя вышеизложенное, можно утверждать, что создание и внедрение общего информационного ресурса в рамках корпоративной сети социальной организационно-технической системы позволит обеспечить качественно новый уровень реализации информационных технологий на всех уровнях управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В. В., Блансис А. К., Скурихин А. В. О новой парадигме информационной среды // Проблемы информатизации. 2000. Вып. 1. С. 52—58.
2. Артамонов В. С., Кадулин В. Е., Козленко Р. Н. Концепция единого информационно-функционального пространства органов управления МЧС России // Вестн. Санкт-Петербург. ин-та гос. противопожарной службы. 2003. № 3. С. 54—55.
3. Галкин В. А., Кононыхин В. Н. Абонентские информационно-управляющие системы телеобработки данных М.: Высш. школа, 1990.
4. Горбатов В. А., Павлов П. Г., Четвериков В. Н. Логическое управление информационными процессами М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. ГОСТ 34.003-90. Информационная технология. Автоматизированные системы. Введ. 01.07.91. М.: Изд-во стандартов, 1991.
6. Коровкин С. Д., Левенец И. А., Ратманова И. Д. Решение проблемы комплексного оперативного анализа информации хранилищ данных // Системы управления базами данных. 1997. № 5—6. С. 47—51.
7. Мусаев А. А. Интеграция АСУ крупных промышленных предприятий: принципы, проблемы, решения // Автоматизация и промышленность. 2003. № 10. С. 40—45.
8. Оганесян А. Модели и инструменты интеграции // Открытые системы. 2002. № 11. С. 33—37.

*Сведения об авторе**Сергей Алексеевич Алексеев*

— канд. техн. наук, профессор; Санкт-Петербургская государственная академия театрального искусства, кафедра менеджмента исполнительских искусств; E-mail: ksgati@tart.spb.ru

Рекомендована кафедрой  
менеджмента исполнительских искусствПоступила в редакцию  
07.05.09 г.

УДК 615.478:681.2

С. Ф. Свинын, Л. Э. Хаймина, Е. А. Латухина, А. И. Попов

**МЕДИЦИНСКАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА  
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ**

Рассматривается портативная медицинская информационно-измерительная система, предназначенная для проведения функциональной диагностики состояния органов желудочно-кишечного тракта человека. Описываются методы математической обработки электрогастрограмм, в том числе подход с позиций теории вейвлет-анализа сигналов.

**Ключевые слова:** биомедицинские сигналы, гастроволны, спектральный анализ, доминантная частота, электрогастрография, вейвлет.

**Введение.** Для решения проблем диагностики состояния органов брюшной полости человека широко применяются современные инструментальные средства, причем в последнее время значительно возрастает роль новых информационных технологий. Одним из главных проявлений мышечной активности органов желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) являются так называемые медленные перистальтические волны (МПВ) [1]. Колебания мышц преобразуются в биоэлектрические сигналы и передаются на поверхность тела, где регистрируются специальными приборами — электрогастрографами. Методы обработки сигналов с использованием компьютера обеспечивают возможность перехода от субъективного анализа кривых к

оценкам числовых параметров, показывающим, каким образом развивается заболевание, либо насколько успешно идет лечение.

Отечественной медицинской промышленностью разработаны электронные приборы и системы для проведения электрогастрографии (ЭГГ), в частности исследования моторной функции ЖКТ [2]. Многие системы такого назначения отличаются инвазивностью (т.е. внешним воздействием на организм, вызывающим болезненные ощущения) и высокой стоимостью оборудования, недоступной для многих клиник. Перспективным направлением неинвазивной функциональной диагностики является селективная ЭГГ [3], при которой принципы диагностирования основаны на разделении частот МПВ, генерируемых органами. Сигналы биоэлектрической активности могут быть усилены одновременно по нескольким каналам, отфильтрованы и преобразованы на входе компьютера. Типовое значение доминантной частоты (ДЧ) электрических колебаний, поступающих от желудка, составляет 0,05 Гц для пациентов группы „норма“. При обследовании больных пациентов наблюдаются отклонения от данных стандартных значений.

**Сущность подхода.** Вариант портативной медицинской информационно-измерительной системы (МИИС), использующей принципы селективной ЭГГ, был разработан ранее и описан в работе [3]. В настоящее время разработан модернизированный образец МИИС, в который были внесены существенные усовершенствования, касающиеся как состава аппаратуры, так и программного обеспечения. Внешний вид этого образца приведен на рис. 1. В состав системы входят четырехканальный аналоговый электрогастрограф разработки Института хирургии им. А. В. Вишневского РАМН (Москва) [4], многоканальный низкочастотный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) типа Е-270 разработки фирмы L-Card, ноутбук серии Fujitsu Siemens Amilo 1453 с операционной системой Microsoft Windows XP.

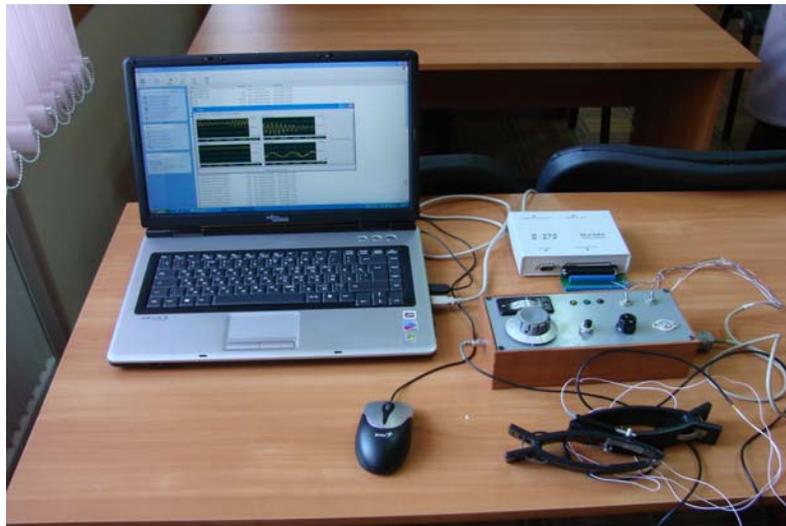


Рис. 1

В предлагаемом образце выносной модуль АЦП Е-270 имеет диапазон входных напряжений  $\pm 10$  В, обладает высокой степенью защиты входных сигналов от импульсных помех, имеет 16 каналов ввода, длина слова в цифровом блоке составляет 15 бит на инфразвуковых частотах. Соединение модуля с компьютером осуществляется через последовательный порт или посредством USB-интерфейса.

**Методы обработки информации.** Основными медицинскими показателями, рассчитываемыми в процессе обработки гастроэнтерограмм, являются значения ДЧ в нескольких каналах, пиковые значения сигналов, а также периоды затухания колебаний на величину 3 дБ. На рис. 2, а, б приведены фрагменты графиков электрогастрограмм соответственно здорового и больного пациентов. На графиках наблюдается значительное различие в диапазонах ампли-

туд (А). Для того чтобы выявить информативные значения пиков колебаний сигналов, необходимо осуществлять записи в течение, по крайней мере, 15—20 мин.

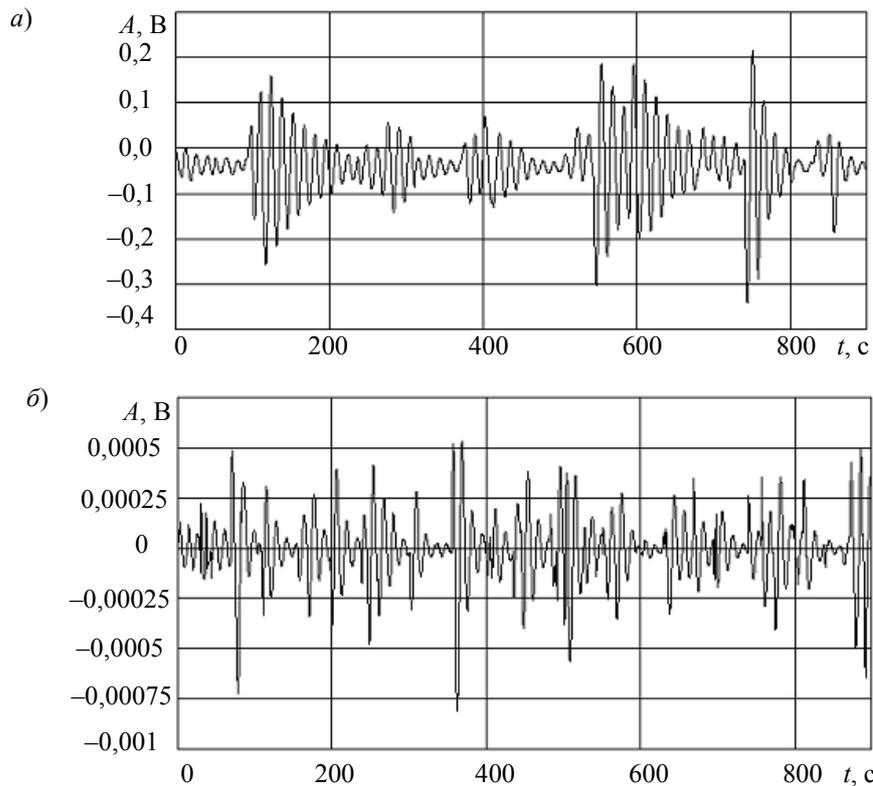


Рис. 2

В ряде записей гастроэнтерограмм проявляются тренды, которые могут быть описаны полиномиальными моделями невысоких порядков и определены методом наименьших квадратов [5], а затем удалены.

Графики спектрограмм строятся с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) и на них отображаются значения ДЧ и боковых составляющих. Для расчета состоятельных оценок спектральной плотности записи сигналов большой длительности делятся на стандартные отрезки, составляющие, как правило, 512 отсчетов, после чего производится усреднение. Сглаживание частотных характеристик гастроэнтерограмм осуществляется на основе спектральных окон Хэннинга [5].

На рис. 3, а, б показаны графики спектральных плотностей (S) электрогастрограмм. В данном примере значения ДЧ (как у здорового, так и у больного пациентов) мало отличаются от стандартных. Это объясняется тем, что источник острого заболевания находится в другом органе ЖКТ, а не в желудке. На спектрограмме больного пациента (см. рис. 3, б) проявляются боковые составляющие. В целом, по наблюдениям за несколькими десятками больных, отклонения значений ДЧ от номинальных могут достигать 30 %.

Современным методом исследования особенностей гастроэнтерограмм как нестационарных сигналов является вейвлет-анализ [6]. Известно, что основными параметрами вейвлет-преобразования являются масштаб (величина, обратная частоте) и сдвиг базисной функции по временной оси. Значение вейвлет-коэффициента  $C_w$  на отрезке сигнала, включающем в себя ограниченное число отсчетов вокруг текущего отсчета  $x_k$ , вычисляется по формуле

$$|C_w(M, s)| = \frac{1}{\sqrt{M}} \left| \sum_{i=k}^{k+s} x_i w_{i-s} \right|,$$

где  $M$  — масштаб вейвлет-преобразования,  $s$  — сдвиг базисной вейвлет-функции по отношению к текущему отсчету,  $w$  — вейвлет-функция,  $k$  — номер отсчета.

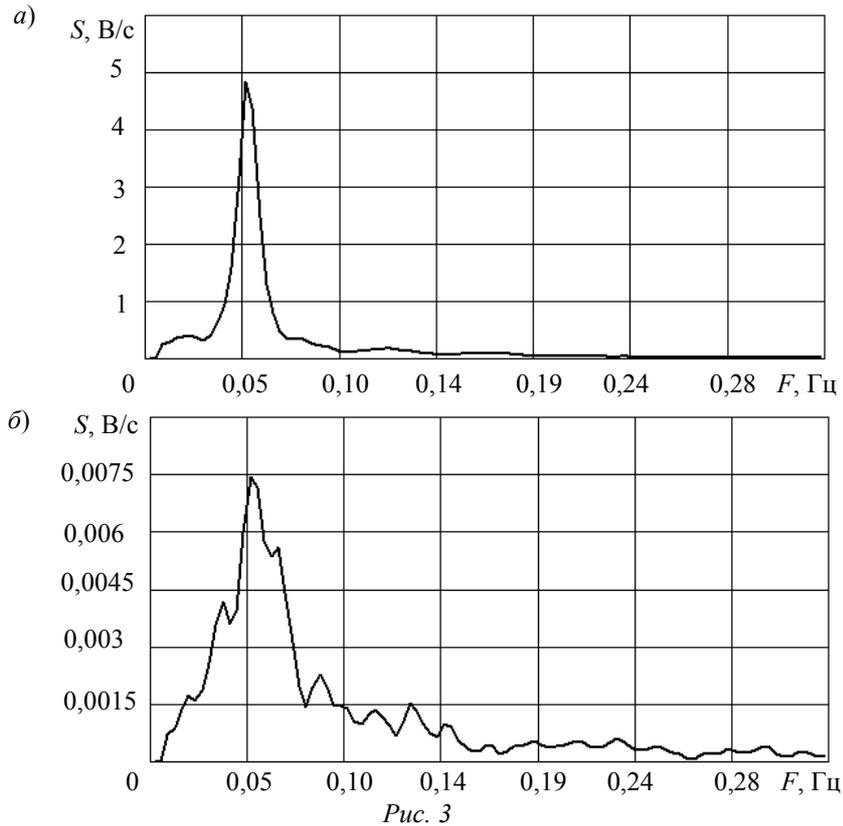


Рис. 3

Вейвлет-преобразование в ходе исследования выполнялось на основе базиса Хаара [6]. На рис. 4 приведены графики зависимостей модулей вейвлет-коэффициентов от масштаба (для здорового (а) и больного (б) пациентов). Графики показывают, что максимумы модулей наблюдаются при  $M \approx 1$ , т.е. при длительностях базисных функций Хаара, соответствующих периодам ДЧ, равным 20 с (частота 0,05 Гц).

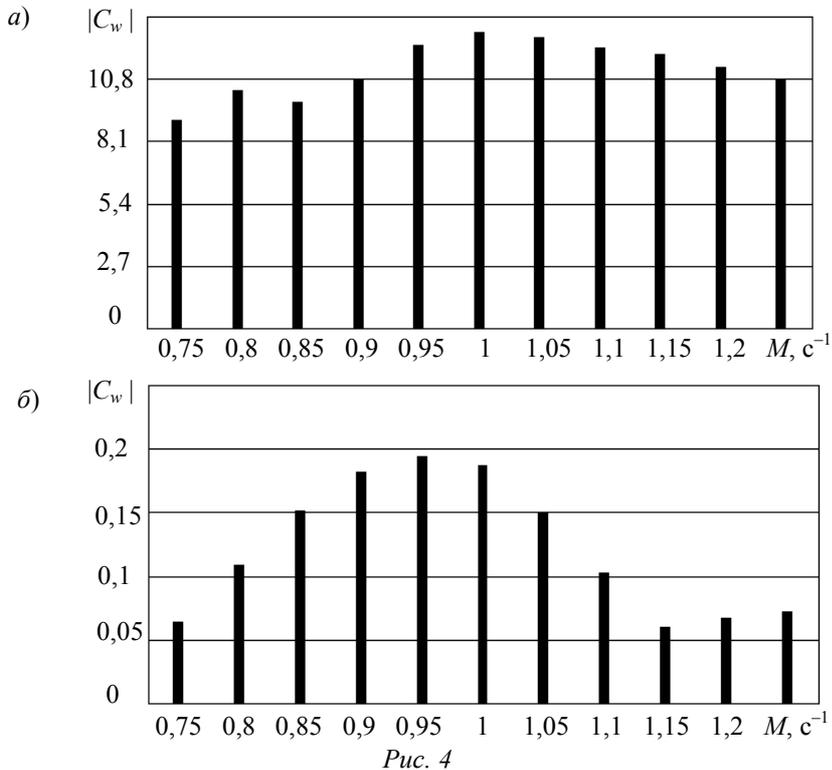


Рис. 4

**Программное обеспечение.** В программном обеспечении (ПО) МИИС можно выделить две части. Первую часть составляет подсистема ввода аналоговых данных, разработанная в среде Visual Studio 2005 на базе MFC (Microsoft Foundation Classes). Ее функцией является организация процессов записи данных гастроэнтерограмм в локальную базу данных. В подсистеме реализована процедура визуализации процессов сбора данных.

Вторая часть ПО представляет собой пакет программ обработки данных, реализованный на основе алгоритмического языка C++ с использованием библиотеки Qt. Такой подход ускоряет обработку и освобождает пользователя (хирурга-гастроэнтеролога) от анализа необязательных данных.

Поясним кратко некоторые особенности функционирования ПО. Вначале выбираются данные конкретного пациента и определяется дата обследования. Таких обследований может быть, по крайней мере, четыре: одно до операции и три после операции в течение 7—10 дней. Программа отображает графики гастроэнтерограмм по четырем каналам. Для врача-хирурга на экран выводится текстовая информация по каждому каналу, отображающая основные параметры состояния пациента (значение пика МПВ, доминантная частота, время затухания волны).

Библиотека Qt обеспечивает эффективное построение графического интерфейса пользователя GUI (Graphic User Interface). Преимущество ее применения заключается в возможности переноса программ из одного компьютера в другой, а также в возможности использования в других операционных системах без модификации кода.

**Заключение.** В рассмотренной системе реализован новый неинвазивный метод функциональной диагностики — селективная электрогастрография. Этот метод позволяет регистрировать и обрабатывать гастроэнтерограммы, проследить явную зависимость между характером сокращений мускулатуры органов ЖКТ и формой регистрируемых биомедицинских сигналов.

Система имеет компактное, портативное исполнение и может быть размещена на передвижном медицинском столике, что способствует проведению полного обследования непосредственно у постели больного.

Применение МИИС в клиниках для обследования и лечения пациентов позволяет технологически максимально упростить и ускорить получение объективных оценок их функционального состояния. Стоимость системы, состоящей из трех блоков (электрогастрографа, АЦП и персонального компьютера), составляет примерно 1200 долл. Имеется возможность исключить из состава оборудования электрогастрограф и перейти от аналоговой фильтрации к цифровой, выполняемой программным путем, что позволит снизить стоимость системы до 800 долл.

Исследования по разработке данной диагностической системы, включая создание программного обеспечения, проводились в рамках регионального проекта № 08-01-98802-р\_север\_а Российского фонда фундаментальных исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В. А., Васильева А. В. Электромиография органов желудочно-кишечного тракта и периферическая электрогастрография [Электронный ресурс]: <[www.library.biophys.msu.ru/gettext?Serial=624](http://www.library.biophys.msu.ru/gettext?Serial=624)>.
2. Саблин О. А., Гриневич В. Б., Успенский Ю. П. и др. Функциональная диагностика в гастроэнтерологии. СПб.: Изд-во ВМА, 2002.
3. Свиньин С. Ф., Комякова К. В., Каримов С. Х. и др. Программно-инструментальный комплекс для функциональной диагностики в хирургической гастроэнтерологии // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 11. С. 71—74.

4. Пат. 2023419 РФ. Селективный электроэнтерогастрограф / В. Н. Яковенко, С. В. Яковенко // Бюлл. Открытия, изобретения. 1994. № 22.
5. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982.
6. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. М.: Техносфера, 2006.

**Сведения об авторах**

- Сергей Федорович Свиньин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, лаборатория автоматизации научных исследований; E-mail: svinyins@mail.ru
- Людмила Эдуардовна Хаймина** — канд. пед. наук, доцент; Поморский государственный университет им. М. В. Ломоносова, кафедра математического анализа, Архангельск; E-mail: jacques@atnet.ru
- Екатерина Александровна Латухина** — аспирант; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, лаборатория автоматизации научных исследований; E-mail: lea2003@atnet.ru
- Александр Игоревич Попов** — аспирант; Поморский государственный университет им. М. В. Ломоносова, кафедра прикладной математики, Архангельск; E-mail: aiprv@mail.ru

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
28.11.08 г.

---

---

# ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

---

УДК 519.71

А. С. КОНДРАШОВ

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКОВ НА ЭЛЕМЕНТЫ САУ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматривается программная реализация задачи определения допусков на элементы САУ при технической реализации законов управления. Задача состоит в вычислении нижней и верхней границ коэффициентов интервального полинома, сопровождающего заданный гурвицев характеристический многочлен, описывающий замкнутую регулятором систему управления. Задача решена с применением математического аппарата полиномов Эрмита — Билера и альтернативных форм записи формул Виета.

*Ключевые слова:* закон управления, динамическая система, треугольная матрица.

Одной из основных характеристик системы автоматического управления (САУ) является надежность. Надежность — как внутренне свойство объекта — проявляется в его взаимодействии с другими объектами внутри системы, а также с внешней средой. Это свойство определяет эффективность функционирования системы. Возникает естественный вопрос: сохраняется ли это свойство при вариациях параметров математической модели САУ в некоторых пределах? Постановка такого вопроса вполне правомерна, поскольку любая математическая модель является приближенной. Варьировать параметры модели необходимо при реализации закона управления, полученного расчетным путем, и для учета изменения параметров САУ. Поскольку количество параметров, влияющих на надежную работу САУ, может быть достаточно велико, расчет возможного диапазона их изменения является процессом трудоемким.

Объектом исследований в настоящей статье является программная реализация алгоритма Подчукаева синтеза гурвицева интервального полинома, т.е. нахождение диапазона возможных вариаций коэффициентов интервального полинома

$$D(s) = s^n + \sum_{i=1}^n [\underline{\alpha}_i, \bar{\alpha}_i] s^{n-i},$$

сопровождающего заданный гурвицев характеристический многочлен (см., например, [1]), описывающий замкнутую регулятором систему управления:

$$d(s) = s^n + \sum_{i=1}^n \alpha_i s^{n-i} = 0,$$

где  $\alpha_i, i = \overline{1, n}$ , — заданные коэффициенты исходного гурвицева характеристического многочлена;  $\underline{\alpha}_i, \overline{\alpha}_i, i = \overline{1, n}, \underline{\alpha}_i < \alpha < \overline{\alpha}_i$ , — неподдающиеся улучшению, согласно Подчукаеву, границы возможных вариаций этих коэффициентов, при которых сохраняется гурвицевость искомого интервального полинома.

Предложенный Подчукаевым алгоритм решения сформулированной задачи базируется на математическом аппарате полиномов Эрмита — Билера, с помощью которого исходный гурвицев характеристический многочлен представляется в виде суммы двух полиномов Эрмита — Билера (четной степени)

$$d(s) = G(\alpha_n, \alpha_{n-2}, \alpha_{n-4}, \dots) + sH(\alpha_{n-1}, \alpha_{n-3}, \alpha_{n-5}, \dots),$$

для которых гурвицевость исходного полинома  $d(s)$  (при условии  $\alpha_1 > 0$ ) адекватна условию, что корни приведенных полиномов  $G$  и  $H$  Эрмита — Билера отрицательны, вещественны и перемежаются, т.е. удовлетворяют неравенству

$$0 > \mu_1 > \eta_1 > \mu_2 > \eta_2 > \dots > \mu_i > \eta_i \dots \quad (1)$$

Согласно Подчукаеву в соответствии с критерием Эрмита — Билера можно записать условие гурвицевости полинома  $D(s)$  в виде условия гурвицевости следующих четырех полиномов Харитоновна:

$$\left. \begin{aligned} d_1(s) &= G_1(\overline{\alpha}_n, \underline{\alpha}_{n-2}, \overline{\alpha}_{n-4}, \dots) + sH_1(\overline{\alpha}_{n-1}, \underline{\alpha}_{n-3}, \overline{\alpha}_{n-5}, \dots); \\ d_2(s) &= G_1(\overline{\alpha}_n, \underline{\alpha}_{n-2}, \overline{\alpha}_{n-4}, \dots) + sH_2(\underline{\alpha}_{n-1}, \overline{\alpha}_{n-3}, \underline{\alpha}_{n-5}, \dots); \\ d_3(s) &= G_2(\underline{\alpha}_n, \overline{\alpha}_{n-2}, \underline{\alpha}_{n-4}, \dots) + sH_2(\underline{\alpha}_{n-1}, \overline{\alpha}_{n-3}, \underline{\alpha}_{n-5}, \dots); \\ d_4(s) &= G_2(\underline{\alpha}_n, \overline{\alpha}_{n-2}, \underline{\alpha}_{n-4}, \dots) + sH_1(\overline{\alpha}_{n-1}, \underline{\alpha}_{n-3}, \overline{\alpha}_{n-5}, \dots). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Для каждого из этих полиномов выполняется неравенство (1). При этом пары полиномов  $[\Phi_{G1}, \Phi_{G2}]$ ,  $[\Phi_{H1}, \Phi_{H2}]$ , сопровождающие приведенные полиномы  $G$  и  $H$  Эрмита — Билера, названы парами Лобачевского, отличительной особенностью которых является перемежаемость границ соответствующих коэффициентов полиномов, иллюстрируемая равенствами (2).

Программная реализация описанного выше алгоритма состоит в формировании пар Лобачевского с использованием альтернативных соотношений, полученных Подчукаевым, для записи формул Виета [1]. Это позволяет после умножения правой или левой соответствующих верхнетреугольных матриц на вектор границ корней положительных пар полиномов  $\Phi_{Gi}$  и  $\Phi_{Hi}$ ,  $i = 1, 2$ , получить вектор чередующихся верхних и нижних границ коэффициентов соответствующей пары Лобачевского.

После формирования пар Лобачевского окончательное вычисление границ коэффициентов искомого гурвицева интервального полинома осуществляется по следующим формулам:

— при нечетном  $n$

$$\left. \begin{aligned} G_1(z) &= \underline{\alpha}_1 \Phi_{G1}(z), G_2(z) = \overline{\alpha}_1 \Phi_{G2}(z); \\ H_1(z) &= \Phi_{H1}(z), H_2(z) = \Phi_{H2}(z); \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

— при четном  $n$

$$\left. \begin{aligned} G_1(z) &= \Phi_{G1}(z), G_2(z) = \Phi_{G2}(z); \\ H_1(z) &= \underline{\alpha}_1 \Phi_{H1}(z), H_2(z) = \overline{\alpha}_1 \Phi_{H2}(z). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В выражениях (3) и (4) учтены верхняя и нижняя границы коэффициента  $\alpha_1$ , вычисленные по приведенным в работе [1] формулам.

Если исходный характеристический многочлен имеет нечетную степень, то полиномы  $G$  и  $H$  Эрмита — Билера будут одинаковой степени  $[n/2]$ , а подлежащие выбору границы ко-

ээффициента  $\alpha_1$  ( $\underline{\alpha}_1$  и  $\bar{\alpha}_1$ ) будут относиться к полиному  $G$ . Если же исходный характеристический многочлен имеет четную степень, порядок полинома  $H$  будет на единицу меньше порядка полинома  $G$  (равного  $n/2$ ), а искомые границы коэффициента  $\alpha_1$  будут относиться к полиному  $H$ .

Программная реализация описанного выше алгоритма осуществлена на языке РНР, поскольку динамическое выделение памяти под рабочие массивы при использовании этого языка осуществляется обращением к встроенной функции `unset()`. Результатом применения этой функции является удаление рабочих массивов после последнего обращения к ним в теле программы.

Особенностью программной реализации рассмотренного алгоритма является формирование шести матриц, из которых — три левые верхнетреугольные для полинома  $G$  и три правые верхнетреугольные для полинома  $H$ . Отсюда следует, что часть кода, реализующая алгоритм формирования этих матриц, должна быть продублирована трижды для полинома  $G$  и шесть раз для полинома  $H$  (трижды в ветви “if” и трижды в ветви “else”). Тем самым код программы (без решения задачи его минимизации) будет длинным и неудобочитаемым, т.е. разобратся в нем и, тем более, внести какие-либо изменения будет проблематично.

Для того чтобы избежать дублирования похожих фрагментов кода программы, разработана система функций, позволяющих получить искомый результат с применением системы флагов, в зависимости от значений которых инициализируются параметры введенных в рассмотрение функций (границные значения счетчиков циклов; порядки рабочих массивов, порядки правых и левых верхнетреугольных матриц и т.д.).

Научную новизну программной реализации задачи синтеза гурвицева интервального полинома, сопровождающего заданный гурвицев характеристический многочлен, составляет применение следующих функций.

**1.** Вычисление левой и правой верхнетреугольных матриц реализовано посредством одной функции, ее входными параметрами являются одномерный массив и служебный флаг, значение которого указывает на тип вычисляемой матрицы. В качестве массива выступает либо вектор корней соответствующего полинома ( $\Phi_{Gi}$  или  $\Phi_{Hi}$ ), либо вектор границ корней положительной пары полиномов  $[\Phi_{Gi}, \Phi_{Hi}]$ . Порядок вектора определяется при его инициализации на основе порядка исходного гурвицева характеристического многочлена. Порядок вычисляемой матрицы равен порядку соответствующего вектора.

**2.** Согласно постановке задачи полиномы  $\Phi_{Gi}$  и  $\Phi_{Hi}$  Эрмита — Билера должны образовывать пару Лобачевского. Для того чтобы это условие выполнялось, необходимо уточнить определение первого ( $\bar{\mu}_1, \underline{\mu}_1$ ) и/или последнего ( $\bar{\eta}_n, \underline{\eta}_n$ ) элементов вектора границ корней положительных пар полиномов  $\Phi_{Gi}$  и  $\Phi_{Hi}$ , т.е. определить их исходя из системы неравенств, полученной в ходе умножения матрицы на вектор. Поэтому для программной реализации данной операции определена функция умножения матрицы на вектор, аргументами которой являются сами множители и результирующий вектор-произведение. Данному вектору присваиваются значения, полученные в ходе выполнения кода функции.

**3.** После этого необходимо инициализировать вектор из элементов правых частей системы неравенств при условии, что коэффициент при  $\bar{\mu}_1, \underline{\mu}_1, \bar{\eta}_n, \underline{\eta}_n$  должен быть равен единице. Для этой цели определена функция, параметрами которой являются результирующий массив корней соответствующего полинома Эрмита — Билера, массив границ корней этого полинома (уточняется его первый или последний элемент) и соответствующая верхнетреугольная матрица.

**4.** Результатом решения системы неравенств является интервал, для оценки нижней и верхней границ которого определена функция, где используется вычисленный ранее вектор

правых частей системы неравенств. В итоге уточненному значению вектора границ корней положительных пар полиномов Эрмита — Билера присваивается значение, равное середине полученного интервала. После этого определяется массив коэффициентов пары Лобачевского.

5. В предложенной Подчукаевым альтернативной записи формул Виета значения элементов верхнетреугольных матриц не зависят от граничных значений  $\bar{\mu}_1$ ,  $\underline{\mu}_1$  и  $\bar{\eta}_n$ ,  $\underline{\eta}_n$ . Эти значения при произведении матрицы на вектор умножаются только на элементы первого (последнего) столбца матрицы. Поэтому для окончательного определения массива коэффициентов пар Лобачевского реализованы две функции (для полиномов  $G$  и  $H$  соответственно), с помощью которых выполняется перемножение первого (последнего) столбца соответствующей верхнетреугольной матрицы на первый (последний) элемент вектора границ корней положительных пар полиномов  $\Phi_{Gi}$  и  $\Phi_{Hi}$ . Умножение производится в цикле “for”. К полученным произведениям в этом же цикле прибавляются соответствующие по индексу значения данного вектора, инициализированные ранее (указанный вектор объявлен в тексте программы глобально). Эти значения и будут являться результатами перемножения остальных элементов матрицы на вектор. Поэтому применение данных функций вместо функций обычного перемножения матрицы на вектор позволяет избежать ненужных операций умножения.

6. Для программной реализации операций, отвечающих за выбор нижних и верхних границ коэффициентов интервального полинома, определены следующие функции. Посредством первой функции вычисляется отношение коэффициентов исходного гурвицева многочлена к соответствующим элементам сформированного ранее массива коэффициентов пар Лобачевского, среди которых определяются максимальный и минимальный элементы этого массива, и по соответствующим формулам вычисляются нижняя и верхняя границы коэффициента  $\alpha_1$ . Для определения границ остальных коэффициентов объявлена вторая функция, с помощью которой производятся вычисления на основе соотношений (3) и (4): в итоге на экран выводятся искомые коэффициенты интервального полинома.

Результатом проделанной работы является программная реализация алгоритма синтеза гурвицева интервального полинома, позволяющая автоматизировать задачу определения допусков на элементы САУ при технической реализации законов управления [2]. Описанная выше программная реализация одной из важнейших задач теории автоматического управления размещена в среде аналитических вычислений „АНАЛИТИК-С“ (Toolbox „III. Анализ — Анализ грубости свойства асимптотической устойчивости гурвицева полинома“): [http://www.sgau.ru/analitik\\_c/](http://www.sgau.ru/analitik_c/) (вычислительный сервис класса WEB 2.0).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подчукаев В. А. Теория автоматического управления (аналитические методы). М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 392 с.
2. Подчукаев В. А., Кондрашов А. С., Мартынов П. В. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2008615000. Программная реализация задачи синтеза гурвицева интервального полинома, сопровождающего заданный гурвицев характеристический многочлен (зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 17 окт. 2008 г.). М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2008.

#### Сведения об авторе

Артём Сергеевич Кондрашов

— аспирант; Саратовский государственный технический университет, кафедра технической кибернетики и информатики; E-mail: kondrashovas@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
технической кибернетики и информатики

Поступила в редакцию  
10.11.08 г.

А. А. АЛЕКСАНДРОВ

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО РАЗЛИЧНЫМ КРИТЕРИЯМ

Рассматривается решение задачи оптимального управления летательным аппаратом как твердым телом, динамика которого описывается уравнениями Эйлера и Пуассона. Исследуется вопрос построения оптимальных траекторий движения ЛА с помощью алгоритма последовательной оптимизации по иерархии критериев качества и с использованием принципа максимума Понтрягина. Приведен сравнительный анализ полученных результатов.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, оптимальное управление, принцип максимума Понтрягина.

**Постановка задачи.** При управлении летательным аппаратом (ЛА) важной задачей является определение оптимальных траекторий его движения на различных участках полета. Исследуем управляемое пространственное движение ЛА. Требуется привести его из начального состояния в заданное конечное при минимизации затрат на управление.

Уравнения динамики ЛА как твердого тела содержат [1, 2]:

— уравнения Эйлера, описывающие движение центра масс в связанной системе координат (СК):

$$\dot{v} = \Omega v + g(n - \varepsilon_2), \quad (1)$$

где  $v$  — вектор абсолютной земной скорости,  $g$  — ускорение свободного падения,  $n$  — вектор перегрузок,  $\Omega$  — матрица Пуассона,  $\varepsilon_2$  — элемент матрицы направляющих косинусов  $\varepsilon$ ;

— уравнение Пуассона, описывающее динамику направляющих косинусов между осями связанной и нормальной СК:

$$\dot{\varepsilon} = \Omega \varepsilon; \quad (2)$$

— уравнения для определения географических координат:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{h} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = d^* \varepsilon v, \quad d^* = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_3 + h} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(R_3 + h) \cos \varphi} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $R_3 = 6\,375$  км — радиус Земли,  $h$  — высота полета,  $\varphi$  и  $\lambda$  — широта и долгота положения ЛА.

Матрица Пуассона (кососимметрическая)

$$\Omega = -\Omega^T = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z & -\omega_y \\ -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix},$$

где  $\omega$  — вектор угловой скорости ЛА относительно земной нормальной системы координат, представленный в проекциях на оси связанной СК.

Матрица направляющих косинусов между осями связанной и нормальной систем координат  $\varepsilon^T = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ , где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  — соответствующие векторы, представлена в таблице,

где  $\gamma$ ,  $\vartheta$ ,  $\psi$  — углы крена, тангажа и рыскания;  $y_g$ ,  $x_g$ ,  $z_g$  — линейные координаты высоты, продольной и боковой дальности.

Координата	$x_g$	$y_g$	$z_g$
$x$	$\varepsilon_{11} = \cos \psi \cdot \cos \vartheta$	$\varepsilon_{21} = \sin \vartheta$	$\varepsilon_{31} = -\sin \psi \cdot \cos \vartheta$
$y$	$\varepsilon_{12} = \sin \psi \cdot \sin \gamma - \cos \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \gamma$	$\varepsilon_{22} = \cos \vartheta \cdot \cos \gamma$	$\varepsilon_{32} = \cos \psi \cdot \sin \gamma + \sin \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \cos \gamma$
$z$	$\varepsilon_{13} = \sin \psi \cdot \cos \gamma + \cos \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \gamma$	$\varepsilon_{23} = -\cos \vartheta \cdot \sin \gamma$	$\varepsilon_{33} = \cos \psi \cdot \cos \gamma - \sin \psi \cdot \sin \vartheta \cdot \sin \gamma$

Представим вектор состояния в виде  $x = [x_1^T, x_2^T, x_3^T, x_4^T, x_5^T]^T$ , где  $x_1 = \varepsilon_1 = (\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{13})^T$ ,  $x_2 = \varepsilon_2 = (\varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{23})^T$ ,  $x_3 = \varepsilon_3 = (\varepsilon_{31}, \varepsilon_{32}, \varepsilon_{33})^T$ ,  $x_4 = (v_x, v_y, v_z)^T$ ,  $x_5 = (\varphi, h, \lambda)^T$ . При этом  $\dot{y}_g = \dot{h}$ ,  $\dot{x}_g = (R_3 + h)\dot{\varphi}$ ,  $\dot{z}_g = (R_3 + h)\cos \varphi \cdot \dot{\lambda}$ .

Задача состоит в приведении ЛА из начального состояния  $x(t_0) = x_0$ :  $\psi_0 = \vartheta_0 = \gamma_0 = 0$ ,  $x_{g_0} = 0$ ,  $y_{g_0} = 200$  м,  $z_{g_0} = 0$ ,  $v_{x_0} = 300$  м/с,  $v_{y_0} = v_{z_0} = 0$ , в конечное  $x_f$ :  $\psi_f = \gamma_f \approx 0$ ,  $\vartheta_f \in [0 \div 5]^\circ$ ,  $x_{g_f} = 2000$  м,  $y_{g_f} = 0$ ,  $z_{g_f} = -200$  м,  $v_{y_f} = v_{z_f} \approx 0$ . Таким образом планируется осуществить маневр по  $S$ -образной траектории при выполнении условий равенства углов и соответствующих проекций скоростей на левом и правом концах траектории.

**Оптимизация динамики ЛА по иерархии критериев.** В настоящее время известно несколько способов решения рассматриваемой задачи. Согласно одному из них оптимизация динамики ЛА производится по функционалу обобщенной работы Красовского [1—3]:

$$I = V[x, t_2] + \int_{t_0}^{t_f} \left[ Q(x, t) + \frac{1}{2} u^T k^{-2} u + \frac{1}{2} u_{\text{опт}}^T k^{-2} u_{\text{опт}} \right] dt,$$

где  $V$ ,  $Q$  — заданные функции, имеющие непрерывные частные производные по  $x$  и  $t$ .

Рассмотрим более сложное решение задачи определения оптимального режима маневрирования — по иерархии критериев качества для функционалов следующего вида [4]:

$$I_1 = V_1 [x, t_f];$$

$$I_2 = V_2 [x, t_f] + \int_{t_0}^{t_f} \left[ \frac{1}{2} u^T k^{-2} u + \frac{1}{2} u_{\text{опт}}^T k^{-2} u_{\text{опт}} + Q(x, t) \right] dt;$$

$$V_1 = \frac{1}{2} \rho_1 \left[ \arcsin \left( -\frac{\varepsilon_{23}}{\cos(\arcsin \varepsilon_{21})} \right) - \gamma^* \right]^2 + \frac{1}{2} \rho_2 \left( \arcsin \varepsilon_{21} - \vartheta^* \right)^2 + \frac{1}{2} \rho_3 \left[ -\arctg \frac{\varepsilon_{31}}{\varepsilon_{11}} - \psi^* \right]^2;$$

$$V_2 = \frac{1}{2} \rho_4 \left( x_{g_f} - x_g^* \right)^2 + \frac{1}{2} \rho_5 \left( y_{g_f} - y_g^* \right)^2 + \frac{1}{2} \rho_6 \left( z_{g_f} - z_g^* \right)^2,$$

$$Q = \frac{1}{2} (n - n^*)^T \beta (n - n^*), \quad \beta = \text{diag}(\beta_1, \beta_2, \beta_3).$$

Здесь  $\rho_k$ ,  $k = 1, \dots, 6$ ,  $\beta_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , — весовые коэффициенты;  $u = [\dot{n}^T, \dot{\omega}^T]^T = [\dot{n}_x, \dot{n}_y, \dot{n}_z, \dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z]^T$  — вектор управления;  $\dot{n}_x$ ,  $\dot{n}_y$ ,  $\dot{n}_z$  — производные компонент вектора перегрузки в связанных осях;  $\dot{\omega}_x$ ,  $\dot{\omega}_y$ ,  $\dot{\omega}_z$  — производные компонент вектора угловых скоростей; индексом „\*“ отмечены заданные значения соответствующих переменных.

Управление определяется как  $u = u_1 + u_2$ ,  $u_1$  и  $u_2$  минимизируют критерии оптимальности  $I_1$  и  $I_2$  соответственно.

В алгоритме последовательной оптимизации  $u_1 = \Delta Y \delta(t)$ ,  $\delta(t)$  — дельта-функция Дирака. На первом этапе вычисляется величина  $\Delta Y$  путем итераций на модели ЛА, описываемой уравнениями (1)—(3), при  $u = 0$  из условия минимума критерия  $I_1$  по  $\Delta Y$  [4]. При этом минимум определяется последовательно для всех компонент вектора управления.

На втором этапе при  $Q = 0$  сигнал управления можно найти аналогично способу решения задачи с одним критерием в виде:  $u_2 = -k \frac{\Delta V_2}{\Delta Y}$ . Отличие здесь заключается в том, что приращение  $\Delta V_2$  определяется при  $Y(t) = Y(t) + \Delta Y(t)$ .

Момент времени  $t_f$  корректируется на втором этапе уравнением [3]  $\dot{t}_f = -k_t^2 H_{t_f}$  в обеспечение условия равенства нулю гамильтониана  $H(x, p, u, t)|_{t_f} = 0$ .

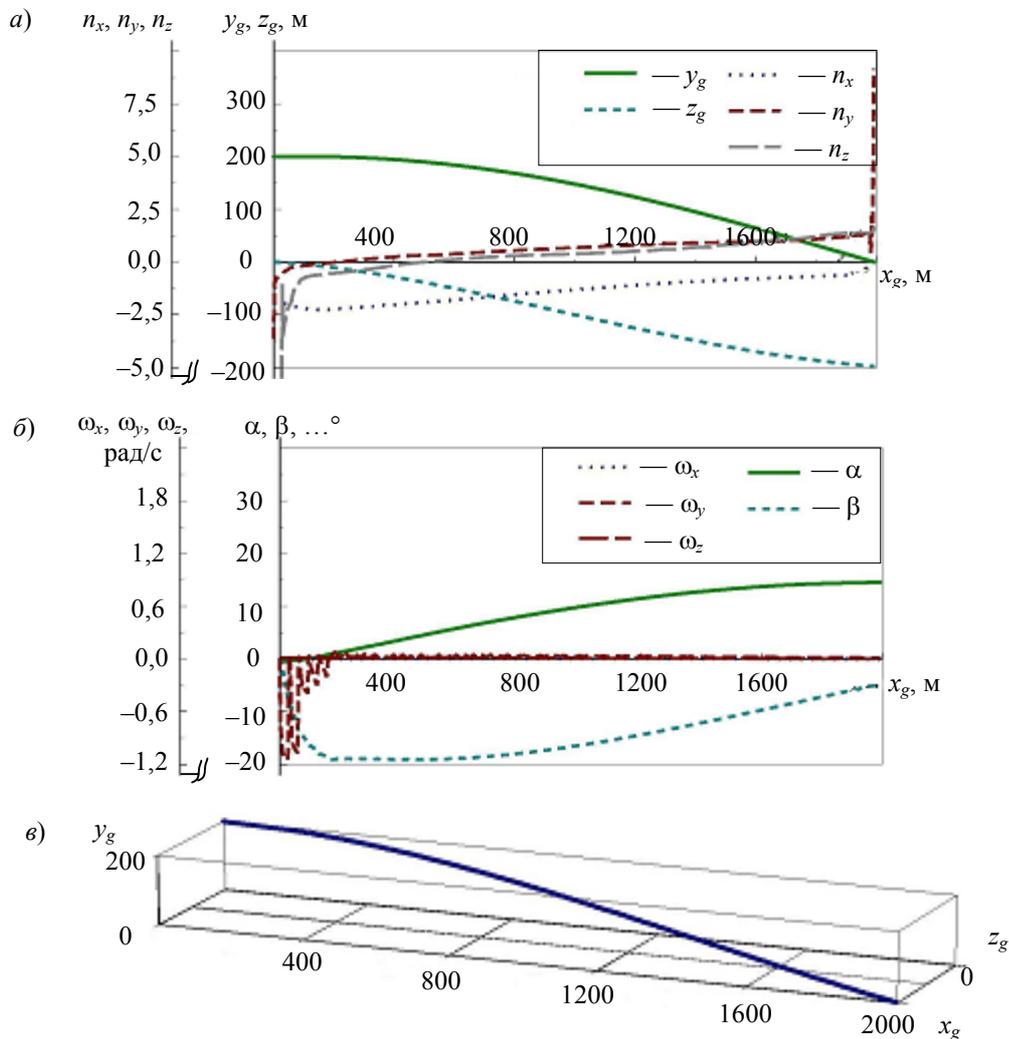


Рис. 1

На рис. 1, а—в представлено решение задачи оптимизации динамики ЛА по иерархии критериев: а — проекции оптимальной траектории и зависимости  $n_x(x_g)$ ,  $n_y(x_g)$ ,  $n_z(x_g)$ ; б — углы  $\alpha(x_g)$ ,  $\beta(x_g)$  и зависимости  $\omega_x(x_g)$ ,  $\omega_y(x_g)$ ,  $\omega_z(x_g)$ ; в — пространственный вид оптимальной траектории.

**Оптимизация динамики ЛА при минимизации затрат на управление.** Содержание данного раздела является продолжением и развитием ряда исследований по оптимальному управлению с использованием модели, описанной уравнениями (1)—(3) [1—5]. Оптимальное управление строится по принципу максимума Понтрягина [6].

В качестве целевого функционала выбирается критерий Лагранжа

$$I = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (u^T k^{-2} u) dt,$$

отражающий минимизацию затрат на управление на интервале оптимизации; здесь  $k^{-2} = \text{diag}[k_1^{-2}, \dots, k_6^{-2}]$ ,  $t_0$  и  $t_f$  — начальный заданный и свободный конечный моменты

времени соответственно,  $u = [n^T, \omega^T]^T = [n_x, n_y, n_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$  — вектор управления.

Синтез оптимального управления по принципу максимума [6] сводится к решению двухточечной краевой задачи, которая решается методом Ньютона [7]. Выбранный метод численного решения позволяет добиться сходимости и необходимой точности решения.

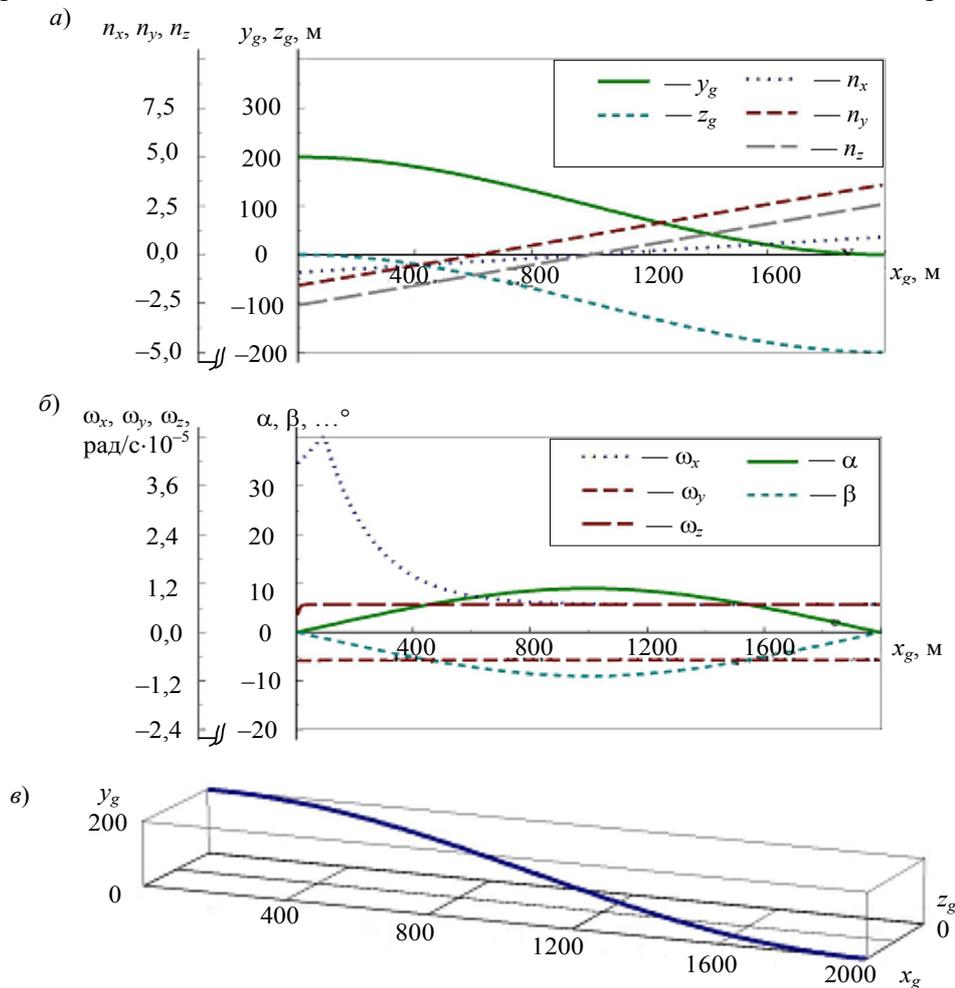


Рис. 2

При заданных начальных условиях в течение одной итерации были получены [8] оптимальные начальные значения сопряженных переменных. Решение по критерию Лагранжа представлено на рис. 2, а—в: а — проекции оптимальной траектории и зависимости  $n_x(x_g)$ ,  $n_y(x_g)$ ,  $n_z(x_g)$ ; б — углы  $\alpha(x_g)$ ,  $\beta(x_g)$  и зависимости  $\omega_x(x_g)$ ,  $\omega_y(x_g)$ ,  $\omega_z(x_g)$ ; в — пространственный вид оптимальной траектории.

**Заключение.** Рассмотрена задача построения оптимальных траекторий полета ЛА с помощью алгоритма последовательной оптимизации по иерархии критериев и с использованием принципа максимума. Оба алгоритма позволяют реализовать  $S$ -образные траектории. Алгоритм последовательной оптимизации имеет вычислительные преимущества по сравнению с решением задачи по принципу максимума за счет использования аналитических выражений для прогнозируемых значений вектора состояния. При решении задачи по принципу максимума Понтрягина при минимизации затрат на управление в вектор невязок можно включить любое количество заданных на правом конце компонент вектора состояния без изменения структуры алгоритма. Полученное по принципу максимума управление отличается близким к линейному характером для данного типа траектории и находится за одну итерацию методом Ньютона.

Исследования показали, что с помощью рассмотренных алгоритмов оптимального управления по различным критериям можно решать задачи маневрирования ЛА в широком диапазоне задания начальных и конечных условий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красовский А. А. Метод быстрого численного интегрирования одного класса динамических систем // Изв. АН СССР. Сер. Техн. кибернетика. 1989. № 1. С. 3—14.
2. Красовский А. А. Основы алгоритмического обеспечения систем автоматического управления полетом с глубокой интеграцией // Вопросы кибернетики: Проблемы комплексирования кибернетических динамических систем / Науч. совет АН РСФСР по комплексной проблеме „Кибернетика“. М., 1992. С. 6—30.
3. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. 200 с.
4. Wang H. M., Kabanov S. A. Optimal control of the return of a flying object on the hierarchy of criterion of quality // Proc. 2002 FIRA Robot World Congress. Seoul, Korea. 2002. P. 187—190.
5. Кабанов С. А. Алгоритм последовательной оптимизации со спиральным прогнозом для управления спускаемым аппаратом // Изв. РАН. Сер. Техн. кибернетика. 1993. № 4. С. 141—147.
6. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Физматлит, 1961. 392 с.
7. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978. 488 с.
8. Кабанов С. А., Александров А. А. Прикладные задачи оптимального управления: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 2007. 76 с.

#### *Сведения об авторе*

**Антон Аскольдович Александров** — аспирант; Балтийский государственный технический университет „Военмех“, кафедра систем обработки информации и управления, Санкт-Петербург; E-mail: antonhill@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
систем обработки информации  
и управления

Поступила в редакцию  
05.06.08 г.

И. А. БЕССМЕРТНЫЙ

## МЕТОДЫ ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АГЕНТА

Обсуждается возможность создания универсального интеллектуального агента для извлечения знаний из глобальной семантической сети. Рассматриваются проблемы практической реализации интеллектуального агента, в частности комбинаторная сложность. Предлагаются способы сокращения размерности задачи поиска.

*Ключевые слова:* интеллектуальный агент, глобальная семантическая сеть, инженерия знаний.

**Введение.** Провозглашенная W3C консорциумом (World Wide Web Consortium) цель глобальной семантической сети (ГСС, Semantic Web) заключается в создании универсальной среды для обмена данными, управления персональной информацией, интеграции корпоративных данных и глобального совместного доступа к коммерческой, научной и культурной информации. Всемирная сеть Интернет, построенная на основе протокола HTTP (Hypertext Transfer Protocol), не обеспечивает достижения этой цели в полной мере, поскольку ресурсы, представленные HTML-документами (Hypertext Markup Language), предназначены исключительно для просмотра человеком, тогда как количество документов измеряется миллиардами, что существенно превышает человеческие возможности. Используемая в HTML-документах разметка Web-страниц предназначена только для форматирования текста на экране и не содержит метаданных, позволяющих извлечь смысл документов. Концепция ГСС предполагает автоматизацию обработки информации, хранящейся на сетевых ресурсах.

В программной статье основателя Интернета Тима Бернерса Ли [1] предложено снабдить обычные Web-страницы тегами, описывающими факты, а также правилами, используя которые можно извлекать новые факты. Факты представляются триплетом  $t = \{S P O\}$ , где  $S$  — субъект,  $O$  — объект,  $P$  — предикат (отношение между субъектом и объектом). Триплет является частным случаем предиката в языке Prolog, поэтому в дальнейшем такие триплеты будем называть предикатами, чтобы придерживаться более привычной терминологии. Правило имеет вид „ЕСЛИ  $c$  ТО  $g$ “, где  $c = (c_1 \text{ И } c_2 \text{ И } \dots c_n)$ ,  $g = (g_1 \text{ И } g_2 \text{ И } \dots g_k)$ ,  $c_1, c_2, \dots, c_n$  — предикаты условия (тело правила),  $g_1, g_2, \dots, g_k$  — предикаты результата (заголовок) правила. Цель настоящей статьи — исследование принципов извлечения знаний из ГСС. Используемые методы — методы искусственного интеллекта [2].

**Концептуальная модель интеллектуального агента.** Для автоматического поиска знаний должны создаваться специальные программы — интеллектуальные агенты (далее — просто „агенты“), выполняющие поиск на дереве решений. Сформулируем требования к агенту, вытекающие из целей и задач ГСС [1, 3]:

- универсальность: данное требование означает применимость агента для различных предметных областей, а также языков, на которых представлены данные;
- доступность для конечного пользователя: пользователь не обязан обладать специальными знаниями, чтобы сформулировать запрос;
- автономность: отсутствие необходимости вмешательства пользователя в ход обработки запроса;
- достоверность результатов: агент должен формировать не только результат, но и оценку степени доверия к нему;
- разумное время ответа: время выдачи ответа должно быть, по крайней мере, меньше времени сохранения актуальности данных и меньше времени, затрачиваемого на традиционный поиск в Интернете.

Перечисленный набор требований является минимальным, поскольку не отражает проблем конфиденциальности данных, возможности взаимодействия многих агентов и др. Тем не менее даже в таком наборе требования противоречат друг другу. В частности, универсальность неизбежно влечет за собой сложность формулирования запроса, что требует от пользователя специальной подготовки. Требование автономности вступает в противоречие с требованием разумного времени ответа, поскольку отсутствие возможности консультации с пользователем может привести к углублению в тупиковые ветви дерева поиска. Кроме того, при автономной обработке запроса предполагается, что запрос сформулирован достаточно четко. Проще говоря, пользователь точно знает, что он хочет получить, однако такая ситуация характерна для ограниченного набора задач. Таким образом, одновременное выполнение всех перечисленных требований представляется невозможным, и при реализации интеллектуального агента должен быть достигнут компромисс между противоречивыми требованиями.

Функциональная модель интеллектуального агента может быть описана следующим образом.

1. Пользователь формулирует задание, которое преобразуется к виду, пригодному для формирования поисковых запросов.
2. Агент формирует запросы к поисковым серверам и получает список онтологий, содержащих запрашиваемые сущности или свойства.
3. С помощью онтологий задание пользователя приводится к набору предикатов условий, описывающих то, что известно, и предикатов цели, которую необходимо найти или истинность которой необходимо подтвердить.
4. Формируется запрос к поисковым серверам на получение списка ресурсов, релевантных цели.
5. Выполняется последовательная загрузка ресурсов из списка поиска и их сопоставление с предикатами цели. Если найденные факты подтверждают истинность цели, то пользователю возвращаются найденные значения переменных, и работа агента завершается.
6. Если в ходе продвижения к цели агент находит правила, в теле которых есть предикаты, отсутствующие в выборке документов, то может потребоваться новый поиск в ГСС. Таким образом, возможно углубление в цепочку правил.

**Проблемы практической реализации универсального интеллектуального агента.** Идеализированная модель, представленная выше, является достаточно простой для реализации. Рассмотрим свойства реальных ресурсов ГСС и задач, которые могут существенно увеличить сложность поиска решения.

*Комбинаторная сложность задачи поиска* в ГСС. Вышеописанная модель агента реализует классическую задачу неинформированного поиска [2] методом обратного вывода (back chain reasoning), сложность которой можно оценить следующим образом. Пусть  $r$  — среднее количество правил, релевантных запросу при каждом обращении к базе знаний,

$n$  — среднее число предикатов в теле каждого правила,  $d$  — средняя глубина вложенности правил. Тогда дерево поиска будет содержать  $N$  вершин:

$$N = r + rn + (rn)^2 + \dots + (rn)^d = r + \sum_{i=1}^d (rn)^i .$$

На рис. 1 отображена зависимость сложности (времени обхода  $T$ ) дерева поиска от числа правил и количества условий в правиле для  $n = 6$ . Если, как принято в работе [2], скорость поиска считать равной 10 000 правил в секунду, то время полного обхода дерева при  $r=20$ ,  $n=6$  и  $d=6$  составит 9,5 лет. Поясним это на примере Гражданского кодекса РФ, который насчитывает 1542 статьи по несколько пунктов в каждой. Таким образом, база знаний на его основе будет состоять из нескольких тысяч правил, и любой запрос на юридическую тему будет к ним обращен. Поскольку сходные правила применяются для разных субъектов права, агент может извлекать правила для предпринимателей, физических или юридических лиц, относящиеся к внутреннему или международному праву. Следовательно, количество правил, релевантных запросу, может быть существенно больше единицы.

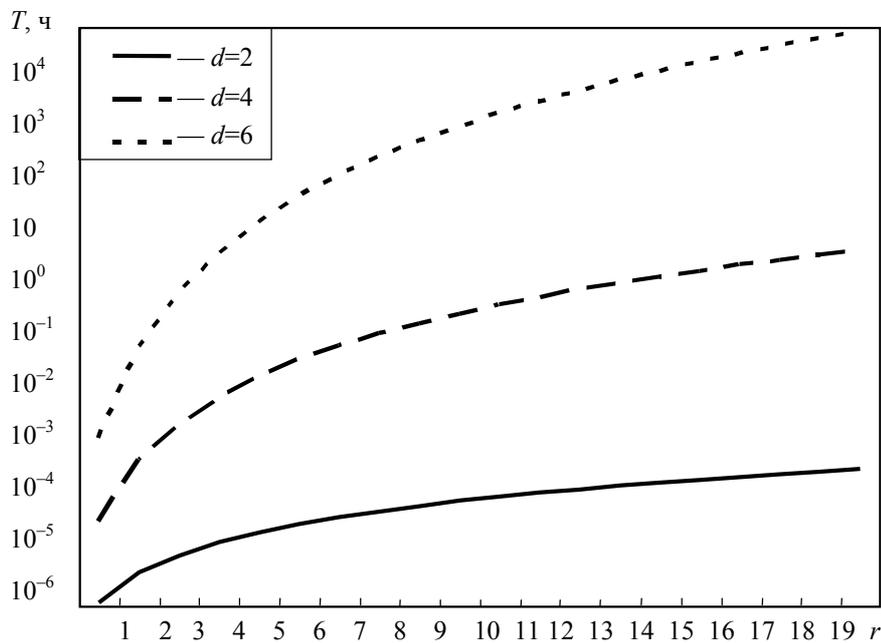


Рис. 1

Развертывание вершин дерева поиска на распределенных ресурсах требует, чтобы эти ресурсы были найдены и загружены. В случае применения алгоритма обхода дерева сначала вглубь требуется  $Q$  операций поиска, которое может быть вычислено по формуле

$$Q = 1 + rn + (rn)^2 + \dots + (rn)^{d-1} = \sum_{i=0}^{d-1} (rn)^i .$$

Если использовать алгоритм поиска сначала в ширину, то количество операций поиска будет равно глубине  $d$  вложенности правил, но потребуются запоминать  $N - (rn)^d$  (все, кроме последнего уровня) результатов поиска. Для приведенного выше примера обхода дерева при  $r=20$ ,  $n=6$  и  $d=6$  потребуется около 25 Тбайт при условии, что одна ссылка занимает 1кбайт памяти.

Таким образом, поиск в ГСС путем простого перебора может оказаться очень длительным и даже бесконечным.

*Множество онтологий для каждой предметной области.* В предположении, что задание пользователя формализуется с использованием одной онтологии, соответственно и поиск осуществляется среди документов, оформленных с использованием той же онтологии. На

практике одной предметной области может соответствовать множество онтологий. Так, в частности, семантический поисковый сервер SWOOGLE ([swoogle.umbc.edu](http://swoogle.umbc.edu)) по ключевым словам *camera* и *viewfinder* возвращает 24 ссылки на одни только англоязычные онтологии, относящиеся к фотокамерам, при этом каждая из онтологий может быть использована для создания семантических документов.

*Множество единиц измерения.* Разные факты могут содержать одни и те же атрибуты в разных единицах измерения. Выполнение операций сравнения требует приведения всех атрибутов к одной единице измерения. Различными могут быть также и способы измерения одних и тех же атрибутов. Например, размер фоточувствительной матрицы цифровых фотокамер может выражаться диагональю в долях дюйма или длинами сторон в миллиметрах. Приведение данных к одной системе единиц измерения требует применения специальных правил, а значит, увеличения размерности задачи поиска.

*Неполная информация.* В ходе применения правил агент может сталкиваться с ситуацией, когда факты или значения переменных установить невозможно. Обычно это означает неполное описание проблемы пользователем и требует уточнения. Здесь существуют две проблемы. Во-первых, пользователь должен понимать, что стоит за именем переменной, значение которой он должен установить. Онтологии, представленные в настоящее время на Интернет-ресурсах, далеко не всегда снабжены подробными комментариями, позволяющими идентифицировать объекты и их атрибуты. Во-вторых, углубление в дерево поиска может приводить к чрезмерному количеству вопросов, не относящихся к проблеме.

**Методы ускорения поиска.** Сокращение комбинаторной сложности задач поиска обычно достигается путем использования эвристических функций, позволяющих оценивать перспективность ветвей поиска [2]. Однако выбор эвристики — процесс творческий и индивидуальный для каждой предметной области. Рассмотрим, какие другие решения могут уменьшить размерность задачи поиска.

*Управление глубиной вложенности правил.* График, представленный на рис. 1, демонстрирует, что уменьшение глубины дерева поиска в два раза может сократить время его обхода на 4 порядка. Сознательное ослабление логической мощности агента позволит решать несложные задачи в разумные сроки и лишь для нетривиальных задач задавать увеличенную глубину поиска: понятно, что для этого потребуется привлечение больших вычислительных мощностей. Кроме того, обычно самые простые решения, лежащие на поверхности, являются самыми эффективными.

*Сужение горизонта поиска (кругозора агента).* Несмотря на то, что коэффициент ветвления на дереве поиска влияет на его сложность гораздо слабее, чем глубина дерева, уменьшение количества правил может также сократить время поиска решения, причем без ухудшения качества. Например, базу знаний на основе Гражданского кодекса РФ можно разделить на 7 отдельных баз по числу его разделов, поскольку каждый из разделов содержит данные, не пересекающиеся с информацией из других разделов. В то же время нетривиальный поиск может потребовать обращения к самым разным областям знаний, что компенсируется возможностью появления неожиданных решений.

*Диалоговый режим поиска.* В соответствии с функциональной моделью агента предполагается, что пользователь описывает проблему, а затем агент ведет поиск решения. Однако далеко не всегда пользователь может сразу задать все исходные данные, поскольку не знает, что известно агенту. Следовательно, неизбежно уточнение цели в процессе развертывания дерева поиска. Кроме того, агент может консультироваться с пользователем перед углублением в разветвленную часть дерева, что потребует много времени на ее обход, в то время как пользователь может решить, стоит ли спускаться по этой ветви.

*Обучение агента.* Результаты успешного поиска могут сохраняться в виде фактов, что позволит в дальнейшем обеспечить к ним быстрый доступ. Данный метод широко используется

естественным интеллектом, начиная от таблицы умножения и заканчивая библиотеками шахматных партий лучших гроссмейстеров. Основная проблема реализации обучения — возможность получения ложных выводов и необходимость их последующего поиска и удаления в большом массиве накопленных фактов. Кроме того, требуется корректировать правила, которые приводят к созданию ложных фактов. В противном случае дерево решений станет только более разветвленным и вместо сокращения поиска будет его существенное усложнение. Обучение имеет смысл даже внутри одной операции поиска (кратковременная память). Рассмотрим в качестве примера известную логическую игру „23 спички“. Правила игры простые: два игрока по очереди берут из кучки одну, две или три спички. Проигрывает тот, кто берет последнюю спичку. На рис. 2 отображен фрагмент дерева поиска для начального состояния — 6 спичек. Число в вершине означает количество оставшихся спичек, дуги — ходы игроков. Полный обход данного фрагмента требует развертывания 28 вершин. Пунктиром на графе обозначены повторяющиеся фрагменты. Если запоминать результат первого обхода каждого из таких фрагментов, это избавит от необходимости повторного углубления и сократит число развертываемых вершин до 12 (выделены фоном), т.е. более чем в два раза. Естественно, такой прием имеет смысл только при поиске сначала в глубину. Полное дерево поиска для начального состояния (23 спички) содержит 900 140 вершин, а поиск до первого решения — 20 009 вершин; в этом случае запоминание промежуточных результатов сократит обход до 57 вершин или в 351 раз.

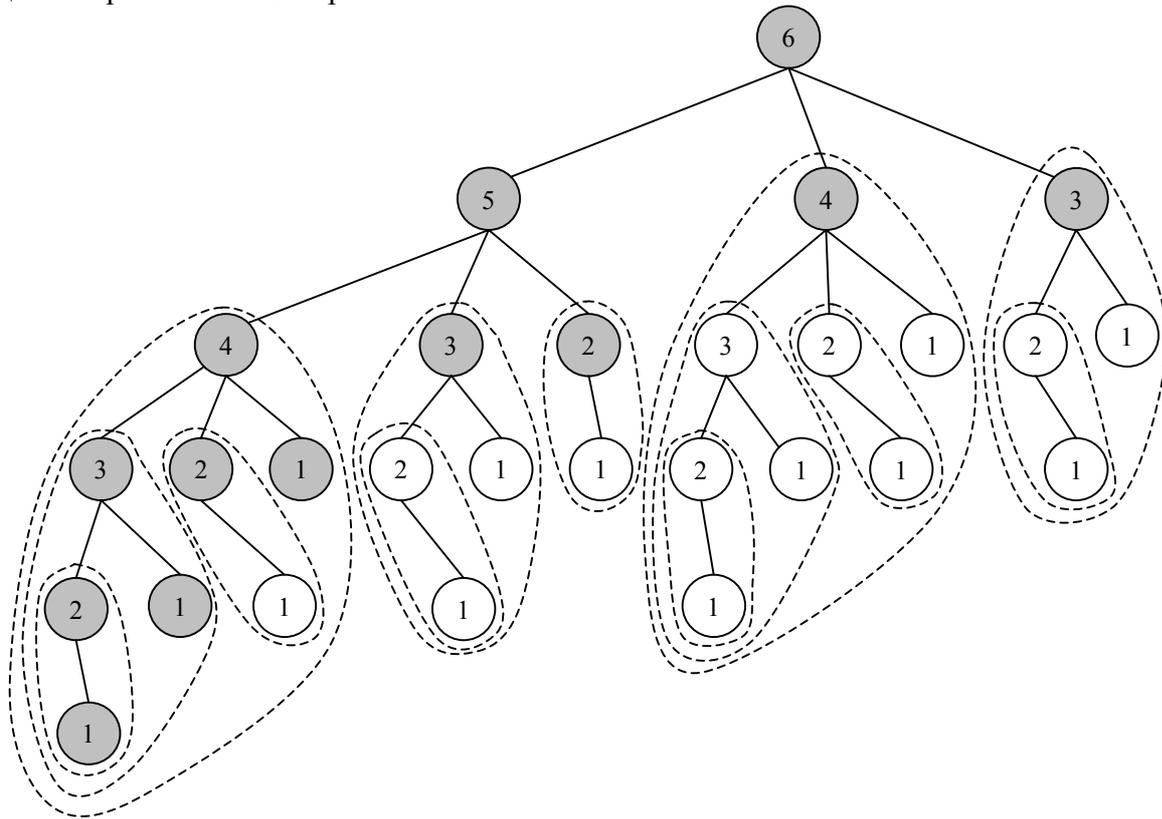


Рис. 2

**Использование контекста.** Пользователь может персонализировать агента созданием базы знаний о контексте. База знаний контекста также является результатом обучения агента и избавляет пользователя от необходимости постоянно отвечать на одни и те же вопросы.

**Заключение.** Создание универсального интеллектуального агента для глобальной семантической сети — это решение задачи поиска на дереве решений. Обширная база знаний, размещенная в ГСС, делает комбинаторную сложность этой задачи непомерно высокой, что не позволяет решить ее методом простого перебора. Вследствие недостаточного числа ресурсов ГСС, содержащих формализованные знания, отсутствует возможность проведения натур-

ных экспериментов. Поэтому для исследования методов построения баз знаний, апробации алгоритмов поиска, визуализации знаний и обучения основам семантических сетей автором настоящей статьи разработана программа, реализующая создание баз знаний и функции интеллектуального агента [4—6]. Программа написана на языке Visual Prolog 7.1 и в настоящее время проходит опытную эксплуатацию в учебном процессе на кафедре вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berners-Lee T., Hendler J., Lassila Ora.* The semantic web // *Sci. Amer. Mag.* 2001. May. P. 29—37.
2. *Кальченко Д.* Интеллектуальные агенты семантического Web'a // *КомпьютерПресс.* 2004. № 10. С. 26—32.
3. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: Современный подход: Пер. с англ. М.: Изд. дом „Вильямс“, 2006.
4. *Bessmertny I.* An intellectual agent in training systems // *Proc. of 5th Intern. Symposium on Education and Information Systems, Technologies and Applications: EISTA'2007.* Orlando, FL. 2007. P. 86—89.
5. *Bessmertny I., Kulagin V.* Semantic network as a knowledge base in training systems // *Proc. of 11th IACEE World Conf. on Continuing Engineering Education.* Atlanta, GA. 2008. P. 95—99.
6. *Bessmertny I.* Visual prolog and semantic networks at knowledge visualization // *Proc. of Visual Prolog Application & Language Conf.: VIP-ALC'08.* St. Petersburg. 2008. P.107—111.

**Игорь Александрович Бессмертный** — *Сведения об авторе*  
канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники;  
E-mail: igor\_bessmertny@hotmail.com

Рекомендована кафедрой  
вычислительной техники

Поступила в редакцию  
15.04.09 г.

О. Ф. НЕМОЛОЧНОВ, А. Г. ЗЫКОВ, В. С. КУЛАГИН, Л. Г. ОСОВЕЦКИЙ,  
В. И. ПОЛЯКОВ, А. В. СУХАНОВ

## МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ НЕДЕКЛАРИРОВАННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ЗНАЧЕНИЙ *DON'T CARE* ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Рассматриваются вопросы верификации вычислительных процессов по графо-аналитическим моделям, управляемых частично-определенными булевыми функциями. Исследуются задачи поиска по булеву графу управления и кубическим покрытиям недеklarированных возможностей и мертвого кода как следствия значения *don't care*. Приведены примеры построения покрытий для булева графа и верификации значений *don't care* в виде покрытия конъюнкции отношений-неравенств, тождественно равных нулю.

**Ключевые слова:** вычислительный процесс, недеklarированные возможности, мертвый код, графоаналитическая модель.

**Введение.** Определим вычислительный процесс как процесс преобразования информации по формулам и алгоритмам, позволяющим вычислять значения некоторого множества переменных. Вычисление значений переменных по разным формулам и алгоритмам осуществляется в соответствии с множеством отношений-неравенств, которыми задаются условия-предикаты. Каждое отношение может либо выполняться, либо не выполняться, т.е. принимать два значения: *true* и *false* (верное и ложное), и, следовательно, образует предикат на множестве значений переменных, входящих в левую и правую части неравенств. Для описания вычислительного процесса, порождаемого логической схемой или программой, необходимо построить модель, которая позволит формализовать его описание и упростить решение различных задач синтеза и анализа с применением аппарата теории множеств и алгебры логики. В качестве такой модели удобно использовать графоаналитическое представление вычислительного процесса [1]. В вершинах графа располагаются итеративные и рекуррентные формулы и условия-предикаты (отношения). Связи между вершинами задаются дугами. В общем случае в вершине может размещаться любой алгоритм преобразования информации. Дуги управления образуют конъюнкции условий-предикатов, их дизъюнкции образуют булевы функции. Основная задача исследования вычислительного процесса (ВП) — его верификация в соответствии с декларацией — заключается в верификации декларированных и недеklarированных возможностей ВП и в поиске несуществующих значений *don't care* (от англ. — букв.: „все равно“, „не заботит“).

Таким образом, задача верификации вычислительного процесса может быть сведена к поиску недеklarированных возможностей (НДВ) и конъюнкций условий-предикатов, тождественно равных нулю, для которых системы неравенств не имеют решений. НДВ на графе вычислительного процесса образуют множество вершин и дуг, недостижимых через последовательности входных наборов, построенных в соответствии с декларацией и значением *don't care*, которые порождают частично-определенные булевы функции. Эти функции при их отображении на  $n$ -мерный двоичный куб  $E_n^2$  могут быть заданы покрытиями комплексов  $K^1(f)$ , где  $f=1$ ,  $K^0(f)$ , где  $f=0$ , и  $K^d(f)$ , где  $f=d$  (*don't care*). Поиск и верификация вершин комплекса  $K(f)$  и составляет основную задачу анализа вычислительных процессов.

**Графоаналитическая модель вычислительного процесса.** Информационные потоки в вычислительных процессах управляются некоторым множеством условий-предикатов в виде отношений-неравенств. Неравенства могут выполняться, порождая предикат  $P$ , равный  $T$ , или

не выполняться, порождая предикат  $F$ . Формула понимается как конечная последовательность переменных и знаков математических операций между ними, т.е. как линейная формула FR. Значение, вычисленное по формуле FR, будем обозначать как  $|FR|$ . Алгоритм понимается как некоторая конечная последовательность элементарных действий, приводящих к однозначному результату — значению переменной. Обобщением формулы или алгоритма является некоторый оператор  $S$ , имеющий одну точку входа ( $T_{in}$ ) и одну точку выхода ( $T_{out}$ ).

Представление и описание вычислительного процесса в виде графа — это некоторая не зависящая от конкретной реализации метамодель, например, в виде логической схемы или программы на алгоритмическом языке.

Для описания вычислительного процесса введем три типа вершин [2]: 1) линейные — для формул и операторов; 2) условные — для отношений-неравенств; 3) объединения связей между линейными и условными вершинами. Связи между вершинами являются однонаправленными, т.е. всегда имеется источник и приемник передачи управления: таким образом, информационные потоки в виде последовательности вершин и дуг являются направленными и детерминированными. Аналитическое описание вершин может быть задано как в виде логико-алгебраических выражений, сочетающих в себе логику условий-предикатов и алгебраические формулы вычисления переменных, так и в виде кубических покрытий [3].

Далее вычислительный процесс может быть фрагментирован на замкнутые параллельные структуры (SR), реализующие альтернативные вычисления переменных  $r$  или разных переменных по различным формулам в зависимости от заданного множества условий-предикатов. Условия-предикаты могут задаваться либо непосредственно булевыми переменными, либо косвенно через отношения-неравенства. Некоторое множество вершин и дуг графа вычислительного процесса образует параллельную структуру, если оно содержит одну точку  $T_{in}$  и одну точку  $T_{out}$ . Для каждой структуры SR все разветвления по условиям должны сходиться в одной точке  $T_{out}$ . На алгоритмическом языке высокого уровня им соответствуют условные операторы.

Любая булева функция  $f$ , входящая в параллельную структуру SR, является полностью заданной, т.е. образует комплекс  $K(f)=K^1(f)\cup K^d(f)\cup K^0(f)$ . Другими словами, если в структуре SR содержится  $n$  условий, то любая булева функция  $f$  из SR может быть отображена на кубе  $E_n^2$  множествами вершин  $K$ , таких что  $K^1 \cup K^0 \cup K^d = E_n^2$ . Здесь  $d$  (*don't care*) — такие вершины куба  $E_n^2$ , в которых значение функции не определено вследствие того, что конъюнкции условий-предикатов дают пустые пересечения множеств значений переменных, входящих в отношения-неравенства, т.е. система неравенств не имеет решения.

Параллельные структуры SR могут находиться между собой в следующих отношениях:

- включение, когда некоторая структура  $SR_j$  содержит в себе некоторую структуру  $SR_i$  ( $SR_j \supset SR_i$ );
- конъюнкция —  $SR_j \& SR_i$ , т.е. последовательная композиция;
- дизъюнкция —  $SR_j \vee SR_i$ , т.е. параллельная композиция.

Вследствие того, что любая структура SR является замкнутой, покрытия входящих в нее булевых функций можно (и нужно) строить независимо друг от друга, полагая, что условия-предикаты локализованы в ней, чем и достигается компактность покрытий. Таким образом, при построении покрытий для некоторой структуры SR другие структуры графа вычислительного процесса могут рассматриваться как некоторые нераскрываемые операторы  $S$ , что соответствует реализации вычислительного процесса, описанного на языке высокого уровня, в виде блоков и модулей.

На рис. 1 показан пример параллельной структуры, реализующей итеративную формулу (при  $k_1 < k_2$ ):

$$r = \begin{cases} \text{IFR}_1 \text{ при } x < k_1; \\ \text{IFR}_2 \text{ при } k_1 \leq x \leq k_2, \\ \text{IFR}_3 \text{ при } x > k_2. \end{cases}$$

На рис. 1 обозначение  $a$  соответствует отношению  $x < k_1$ , обозначение  $b$  — отношению  $x > k_2$ , тогда  $\bar{a} : x \geq k_1$  и  $\bar{b} : x \leq k_2$ . Остальные использованные на рис. 1 обозначения соответствуют принятым в работе [2].

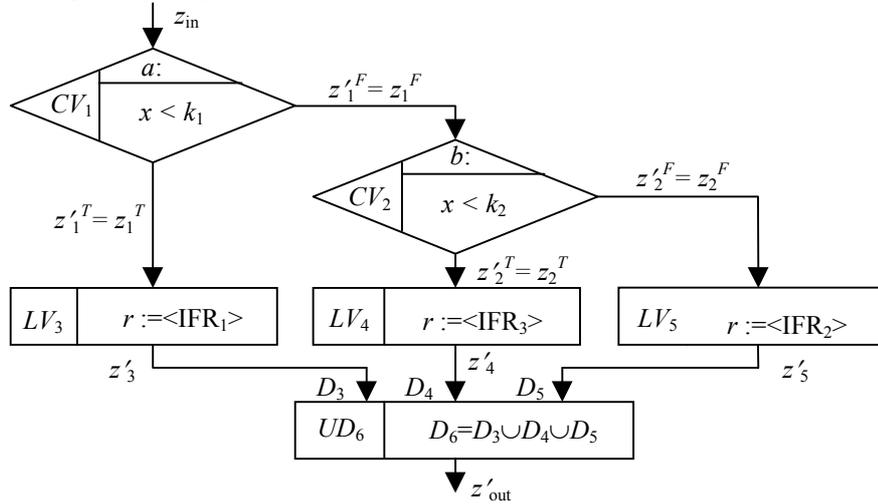


Рис. 1

Выражение для  $r$  на языке высокого уровня может быть записано условным оператором присваивания:

$r :=$  если  $(x < k_1)$ , то  $\langle \text{IFR}_1 \rangle$ ,  
иначе если  $(x > k_2)$ , то  $\langle \text{IFR}_3 \rangle$ ,  
иначе  $\langle \text{IFR}_2 \rangle$ .

Вычисления покрытия для переменной  $r$  сведены в табл. 1, где приведены исходные покрытия для всех вершин графа в соответствии с типовыми покрытиями и принятыми в работе [2] обозначениями.

Таблица 1

$z_{in}$	$a$	$b$	$r$	$r'$	$z_1^T$	$z_1^F$	$z_2^T$	$z_2^F$	$z_3'$	$z_4'$	$z_5'$	$z_{out}'$	Примечание	
									1	0	0	1	$C_1$ } $C_2$ } $C_3$ } $C_4$ } $C(UD_6)$	
									0	1	0	1		$C_5$ } $C_6$ } $C(LV_3)$
											1			
											0			$C_9$ } $C_{10}$ } $C(LV_4)$
													$C_{11}$ } $C_{12}$ } $C_{13}$ } $C(CV_2)$	
														$C_{14}$ } $C_{15}$ } $C_{16}$ } $C(CV_1)$
1	0				0	1								
1	1				1	0								
0	x				0	0								

В табл. 2 приведены пересечения кубов, имеющих непустое значение. Вычисления производились от выхода  $z'_{out}$  ко входу  $z_{in}$  и свелись фактически к перебору четырех кубов из покрытия  $C(UD_6)$ .

Таблица 2

$z_{in}$	$a$	$b$	$r$	$r'$	$z_1^T$	$z_1^F$	$z_2^T$	$z_2^F$	$z_3'$	$z_4'$	$z_5'$	$z'_{out}$	Примечание
1	1	×	×	<IFR <sub>1</sub> >	1	0	0	0	1	0	0	1	$C_1 \cap C_5 \cap C_{15} \cap C_8 \cap C_{10}$
1	0	0	×	<IFR <sub>2</sub> >	0	1	0	1	0	1	0	1	$C_3 \cap C_7 \cap C_{11} \cap C_6 \cap C_{10}$
1	0	1	×	<IFR <sub>3</sub> >	0	1	1	0	0	0	1	1	$C_2 \cap C_9 \cap C_{12} \cap C_6 \cap C_8$
0	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0	0	0	$C_4 \cap C_6 \cap C_8 \cap C_{10}$

Удалив из покрытия промежуточные значения  $z'$ , получим покрытие  $C(r)$  в формате  $z_{in} a b r r' z'_{out}$ :

$$C(r) = \left\{ \begin{array}{c|cc} z_{in} & a & b & r & r' & z'_{out} \\ \hline 1 & 1 & \times & \times & \langle \text{IFR}_1 \rangle & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \times & \langle \text{IFR}_2 \rangle & 1 \\ 1 & 0 & 1 & \times & \langle \text{IFR}_3 \rangle & 1 \\ 0 & \times & \times & \times & \times & 0 \end{array} \right\}.$$

Структура этого покрытия соответствует структуре покрытий для типовых вершин и описывает режим вычисления переменной  $r$  по различным итеративным формулам и режим хранения:  $r = \times$ .

**Поиск и верификация недеklarированных возможностей.** *Недеklarированные возможности* — функциональные возможности программного обеспечения (ПО), не описанные или не соответствующие описанным в документации. Реализацией недеklarированных возможностей являются, в частности, программные закладки.

*Программные закладки* — преднамеренно внесенные в ПО функциональные объекты, которые при определенных условиях (входных данных) инициируют выполнение не описанных в документации функций ПО, приводящих к нарушению конфиденциальности, доступности или целостности обрабатываемой информации [4].

Определим недеklarированные возможности в общем виде как все не описанные в декларации особенности и возможности вычислительного процесса, порождаемого программой в ходе ее исполнения. Природа НДВ носит как объективный, так и субъективный характер в силу сложности и размерности самого программного продукта. Однако для НДВ можно выделить в общих чертах следующие основные источники и составляющие:

— наличие в программном продукте специально предусмотренных закладок для наблюдения и отладки ВП в ходе его проектирования и эксплуатации;

— „замалчивание“ излишне мелких подробностей ВП при составлении декларации вследствие стремления к ее компактности;

— наличие в частично определенных булевых функциях  $f$  управления ВП неопределенных значений  $d$  в виде комплекса  $K^d(f)$ , который объективно существует, но, как правило, не используется и не описывается.

Поиск и верификацию НДВ ВП можно осуществить путем моделирования процесса либо в виде исполнения программы, либо — на более высоком уровне — по графоаналитической модели.

Моделирование ВП проводится на испытательных наборах входных переменных, построенных по его декларации путем прямого исполнения программы в ходе тестовых экспериментов. При этом необходимо фиксировать вершины и дуги графа, которые достижимы из точки  $T_{in}$ , вычисляются и наблюдаются в точке  $T_{out}$  исследуемой программы.

**Определение.** Если множество вершин и дуг графоаналитической модели вычислительного процесса недостижимы в результате тестовых экспериментов, построенных по декларации, то они образуют множество НДВ.

Множество задействованных вершин и дуг графа образуют декларированные возможности (ДВ) ВП и соответственно программы, его реализующей. Таким образом, все множество вершин и дуг  $M(V, D)$  распадается на два подмножества  $M^{ДВ}$  и  $M^{НДВ}$ :  $M(V, D) = M^{ДВ} \cup M^{НДВ}$ . Указанные подмножества можно построить путем моделирования константных „неисправностей“ для условий-предикатов ( $m^1 \equiv 1(T)$  и  $m^0 \equiv 0(F)$ ) непосредственным внесением их либо в программу [5], либо в условные вершины графоаналитической модели ВП при условии, что такая модель построена. С этой целью в ходе тестовых экспериментов производится сравнение результатов вычислений без „неисправностей“ и с заданной „неисправностью“  $m^p \in N$ , где  $N$  — все множество условий-предикатов. Условие-предикат может быть полностью не проверено или проверено только в одном из значений  $T$  или  $F$ . В этом смысле множество проверяемых „неисправностей“ и образует множество вершин и дуг НДВ.

**Поиск и верификация значений *don't care*.** Для любой булевой функции  $f$  от  $n$  переменных область определения состоит из  $2^n$  их значений, задающих канонические формы  $f$ . Это множество значений может быть сопоставлено с вершинами  $n$ -мерного двоичного куба  $E_n^2$ , для упрощения логических выражений можно применять исчисление кубических комплексов путем построения избыточных покрытий в виде дизъюнктивных нормальных форм (простых импликант) или в виде скобочных форм (полученных методом функциональной декомпозиции). Первый способ применяется при реализации ВП в виде логических схем, а второй — в виде программного продукта.

В случае частично-определенных булевых функций область определения из  $2^n$  значений разбивается на два подмножества  $M^1$  и  $M^d$ :  $M^1 \cup M^d = E_n^2$  и  $M^1 \cap M^d = \emptyset$ . Множество  $M^1$  состоит из конъюнкций аргументов, на которых функция принимает значение, равное единице, а множество  $M^d$  состоит из конъюнкций, тождественно равных нулю. Значения функции  $f$  на конъюнкциях из множества  $M^d$  принято обозначать как  $d$  — *don't care*: т.е. все равно какое значение имеет функция  $f$ , оно может быть произвольно присоединено к любой функции управления  $z$ , построенной на множестве  $M^1$ .

В случае если булевы переменные задаются в виде отношений-неравенств, то значениям  $d$  соответствуют системы неравенств, для которых отсутствуют решения, и, следовательно, множество отношений между переменными, входящими в левую и правую части неравенств, дают пустое пересечение.

Итак, определим множество конъюнкций *don't care* как множество конъюнкций, тождественно равных нулю. Поиск таких конъюнкций может быть осуществлен либо путем непосредственного решения систем неравенств в аналитической форме, либо методом моделирования отношений на числовой оси в виде линий Ламберта или непосредственным заданием множеств на плоскости в виде диаграмм Эйлера — Венна [6].

Верификация значения *don't care* состоит в построении покрытий  $C^1$  для  $M^1$  и  $C^d$  для  $M^d$ , которые позволяют производить поиск значения *don't care* в сокращенной форме для подмножеств из  $M^d$  и, следовательно, сократить перебор вариантов при решении систем отношений-неравенств.

Рассмотрим описанные выше положения на примере. Пусть на числовых осях  $x$  и  $y$  заданы четыре отношения:

$$\alpha: x < 4, \quad \beta: x > 5, \quad \gamma: y < 3, \quad \zeta: y > 6.$$

Здесь отношения  $\alpha$  и  $\beta$  не зависят от значений  $\gamma$  и  $\zeta$ , поэтому поиск значения *don't care* можно произвести раздельно.

Итак, если  $x < 4$  и  $x > 5$ , то эта система неравенств не имеет решения: на числовой оси  $x$  невозможно найти значения  $x$ , удовлетворяющие конъюнкции  $\alpha = \beta = 1$ , т.е.  $\alpha\beta \equiv 0$ , что и является значением *don't care*. Аналогично конъюнкция  $\gamma = \zeta = 1$  также не имеет решения, и тождество  $\gamma\zeta \equiv 0$  образует значение *don't care* для  $y < 3$  и  $y > 6$ .

Покрытие множества  $M^d$  относительно множества отношений  $\{\alpha, \beta, \gamma, \zeta\}$  компактно можно записать в виде двух кубов:

$$C^d = \left\{ \begin{array}{cccc} \alpha & \beta & \gamma & \zeta \\ 1 & 1 & \times & \times \\ \times & \times & 1 & 1 \end{array} \right\}.$$

Аналогично можно для верификации значения *don't care* построить покрытие множества  $M^1$  в виде четырех кубов:

$$C^1 = \left\{ \begin{array}{cccc} \alpha & \beta & \gamma & \zeta \\ \times & 0 & \times & 0 \\ 0 & \times & 0 & \times \\ \times & 0 & 0 & \times \\ 0 & \times & \times & 0 \end{array} \right\}.$$

Заметим, что  $C^1 \cup C^d = E_n^2$  и  $C^1 \cap C^d = \emptyset$ : это и свидетельствует о рассмотрении всех конъюнкций для отношений  $\{\alpha, \beta, \gamma, \zeta\}$ .

Рассмотренные решения проиллюстрированы на рис. 2. На рис. 2, а показаны отношения  $\{\alpha, \beta, \gamma, \zeta\}$  в системе координат  $x$   $y$ : видно, что число существующих решений для системы неравенств равно 9, а 7 отношений решений не имеют. На рис. 2, б показана развертка куба  $E_n^2$  в виде карты Карно: 1 — вершины множества  $M^1$ ,  $d$  — множества  $M^d$ .

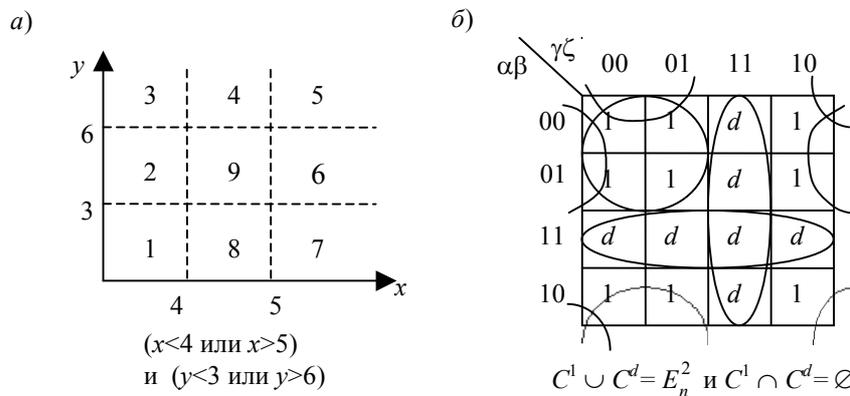


Рис. 2

Как следует из рассмотренного примера, задача поиска и верификации значения *don't care* заключается в переборе всех вариантов решений, этот перебор может быть сокращен, если решения искать сразу в кубической форме.

**Мертвый код как следствие значения *don't care*.** Определим понятие мертвого кода (МК) как множества команд программы, которые не могут быть исполнены ни при каких значениях конъюнкций условий-предикатов. Это может быть только в том случае, если данные конъюнкции тождественно равны нулю. Такие конъюнкции и образуют множества значений *don't care* и порождают частично-определенные булевы функции. Если функции запрограммированы в явном виде, то операторы, заданные в программе только через них, никогда не будут исполняться. Иными словами, мертвый код всегда есть следствие значения *don't care*.

Такие конъюнкции могут быть заданы на уровне булевых переменных в виде явных тавтологий, например,  $a \vee \bar{a}$ ,  $\overline{a\bar{a}}$  или в виде избыточных выражений, например,  $a \vee ab$ ,  $a \vee \bar{a}b$  и т.п. Указанная избыточность может быть следствием ошибок при программировании

условий, например при настройке стандартных шаблонов, и если это ошибка, а не умысел, то она должна быть устранена путем минимизации логических выражений. Заметим, что для настраиваемых шаблонов значение *don't care* может быть только вычислено и указано, в противном случае теряется сам смысл шаблонов как стандартного и апробированного решения.

Если же значение *don't care* запрограммировано сознательно в виде артефакта, то порождаемые операторы образуют закладки. Эти закладки не могут быть обнаружены в ходе тестовых экспериментов по полной декларации, содержащей декларированные и недекларированные возможности программы. В этом и состоит принципиальное различие между мертвым кодом и НДВ.

Мертвый код может быть в неявном виде задан при программировании отношений-неравенств, в этом случае необходимо осуществлять поиск значения *don't care* через решение систем неравенств. Для простоты рассмотрения приведем примеры мертвого кода в виде условных выражений над булевыми переменными. Пусть заданы условные выражения, реализующие операторы  $S_1$  и  $S_2$ , которые могут быть операторами присваивания, перехода, обращения к процедурам либо в общем случае любыми составными операторами, модулями или блоками. Итак, пусть заданы два условных выражения:

если  $(a\bar{a})$ , то  $S_1$ , иначе  $S_2$ ,  
если  $(a \vee \bar{a})$ , то  $S_1$ , иначе  $S_2$ .

В первом выражении оператор  $S_1$  никогда не будет исполняться, а во втором не будет исполняться оператор  $S_2$ . Операторы  $S_1$  и  $S_2$  в данном контексте могут рассматриваться как специально сделанные закладки. Конъюнкции, тождественно равные нулю, показаны на рис. 3, а, б в виде функций управления  $z_i$  на булевых графах, реализующих приведенные выше условные выражения соответственно.

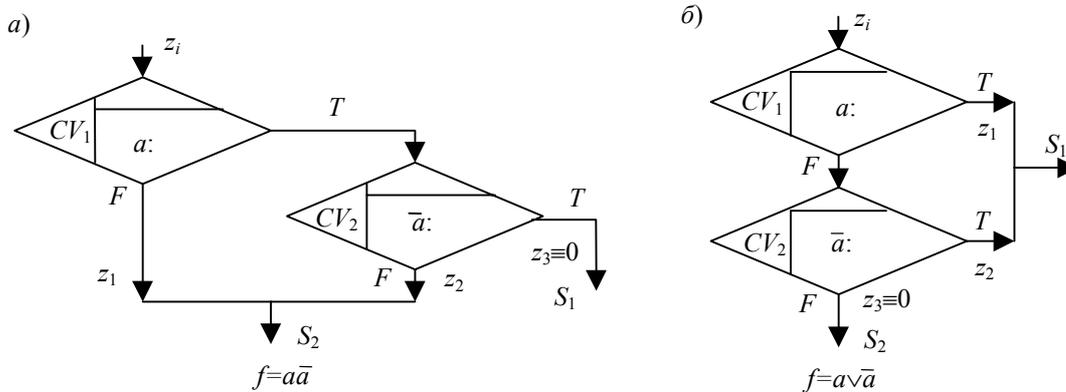


Рис. 3

**Заключение.** Наличие в вычислительном процессе, порождаемом программой при интерпретации ее команд процессором, недекларированных возможностей или мертвого кода несет в себе явную (НДВ) или неявную (МК) угрозу безопасности программному продукту. Эта угроза может быть реализована, например, в виде компьютерного вируса. Поэтому поиск и верификация НДВ и МК является основной задачей в области защиты информации. Решение этой задачи конструктивно может быть найдено путем построения графоаналитической модели или, в частном случае, построением булева графа для функции управления вычислительным процессом. Для сокращения размерности задачи поиска НДВ и МК вычислительный процесс на графоаналитической модели следует разбивать на параллельные структуры. Такое разбиение позволяет локализовать поиск и верификацию НДВ и МК в рамках отдельно взятой параллельной структуры и не рассматривать все множество реализованных в программе условий-предикатов совместно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Немолочнов О. Ф., Зыков А. Г., Поляков В. И. Комплексные кубические покрытия и графоаналитические модели как средство описания вычислительных процессов программ // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. „Интеллектуальные системы“ (AIS'06) и „Интеллектуальные САПР“ (CAD-2006). М.: Физматлит, 2006. Т. 2. С. 3—7.
2. Модель и примитивы вершин циклических вычислительных процессов / О. Ф. Немолочнов, А. Г. Зыков, Л. Г. Осовецкий, В. И. Поляков // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 8. С. 18—23.
3. Немолочнов О. Ф., Зыков А. Г., Поляков В. И. Кубические покрытия логических условий вычислительных процессов и программ // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. Информационные технологии, вычислительные и управляющие системы. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. Вып. 14. С. 225—233.
4. Руководящий документ Гостехкомиссии России „Защита от несанкционированного доступа к информации. Ч. 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия недеklarированных возможностей“. Введ. 04.06.1999 г.
5. Тестирование логических неисправностей вычислительных процессов в программах / О. Ф. Немолочнов, А. Г. Зыков, Л. Г. Осовецкий и др. // Информ. технологии. 2007. № 12. С. 2—5.
6. Кондаков Н. И. Логический словарь. М.: Наука, 1971.

*Сведения об авторах*

- Олег Фомич Немолочнов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики
- Анатолий Геннадьевич Зыков** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики;  
E-mail: zikov\_a\_g@mail.ru
- Вячеслав Сергеевич Кулагин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электроники
- Леонид Георгиевич Осовецкий** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра безопасных информационных технологий
- Владимир Иванович Поляков** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники;  
E-mail: v\_i\_polyakov@mail.ru
- Андрей Вячеславович Суханов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра безопасных информационных технологий

Рекомендована кафедрой  
информатики и прикладной математики

Поступила в редакцию  
06.06.09 г.

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 621.3:007; 621.3:001.891.57

А. М. Водовозов, А. С. Елюков

## ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предложен новый алгоритм параметрической идентификации электромеханических систем с известной структурой. Построена обобщенная математическая модель электромеханической системы, позволяющая проводить идентификацию частично наблюдаемых систем по результатам испытаний, искаженным вследствие шумов.

*Ключевые слова:* параметрическая идентификация, электромеханическая система, математическая модель.

Параметрическая идентификация является ключевой задачей синтеза математической модели электромеханической системы. Несмотря на то, что структура электромеханической системы при идентификации, как правило, считается априори известной, физические параметры системы с течением времени изменяются и поэтому их нельзя рассматривать как стационарные переменные.

Построение общих алгоритмов параметрической идентификации электромеханической системы в общем случае предполагает выбор математической модели, определенной системой уравнений в форме Коши:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= \sum_{i=1}^m a_{1i} f_{1i}(x_1, x_2, \dots, x_n) + b_1 u_1(t); \\ \frac{dx_2}{dt} &= \sum_{i=1}^m a_{2i} f_{2i}(x_1, x_2, \dots, x_n) + b_2 u_2(t); \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{dx_n}{dt} &= \sum_{i=1}^m a_{ni} f_{ni}(x_1, x_2, \dots, x_n) + b_n u_n(t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $a_{ji}$  — идентифицируемые параметры,  $f_{ji}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  — функции вектора состояния,  $u_i(t)$  — входное воздействие; начальные условия вектора состояния  $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$  предполагаются известными.

Система (1) далеко не всегда имеет аналитическое решение в общем виде, поэтому выражение  $x_i(t, A)$ , где  $A$  — матрица параметров, получить не удастся. Кроме того, крайне редко



Для частично наблюдаемых объектов, к которым относятся, например, электроприводы, построение функционала достигается аналитическими преобразованиями системы (2), исключая ненаблюдаемые переменные. При этом линейность функционала не гарантирована. Если преобразование системы (2) невозможно, то идентификация в этом случае весьма затруднена.

В качестве примера рассмотрим задачу параметрической идентификации асинхронной машины с короткозамкнутым ротором по кривой переходного процесса прямого пуска с нагрузкой  $M_c = 4$  Н·м. Система уравнений, описывающая функционирование асинхронной машины в неподвижной относительно наблюдателя системе координат  $[\alpha, \beta]$ , согласно работе [2] имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u_s &= R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + L_m \frac{di_r}{dt}; \\ R_r i_r + L_m \frac{di_s}{dt} + L_r \frac{di_r}{dt} - j\omega L_m i_s - j\omega L_r i_r &= 0; \\ J \frac{d\omega}{dt} &= \frac{3}{2} p_\tau^2 L_m \operatorname{Im}(\bar{i}_s i_r) - M_c p_\tau, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

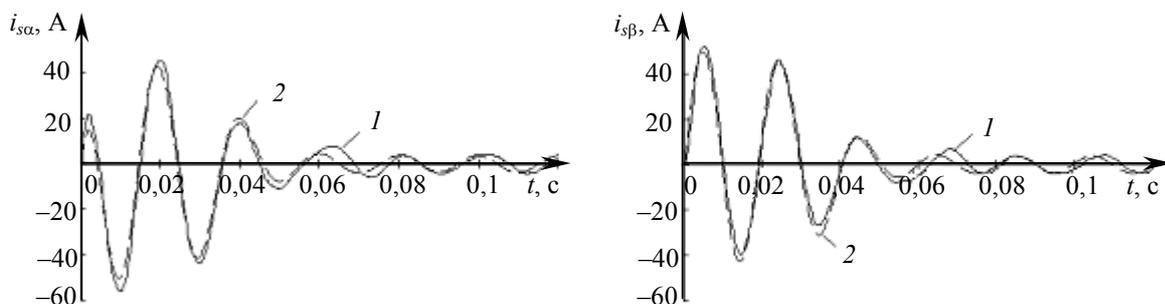
где  $R_r=2,166$  Ом,  $R_s=3,421$  Ом — сопротивления ротора и статора;  $L_r=406$  мГн,  $L_s=401$  мГн — индуктивности ротора и статора;  $L_m=394$  мГн — взаимдуктивность;  $J=0,0021$  кг·м<sup>2</sup> — момент инерции;  $u_s$  — напряжение питания;  $i_s, i_r$  — ток статора и ток ротора;  $\omega$  — частота вращения ротора;  $p_\tau = 1$  — число пар полюсов. (Указанные числовые значения параметров машины марки 5АИ80В2У3 взяты из документации и использованы как начальные условия при численной минимизации функционала ошибки.)

Наблюдаемыми величинами в асинхронной машине обычно являются  $u_s$ ,  $M_c$  и  $i_s$ , поэтому из системы (4) исключаются параметры  $i_r$  и  $\omega$ :

$$\left. \begin{aligned} i_r &= \frac{1}{L_m} \left( \int_0^t u_s dt - R_s \int_0^t i_s dt - L_s i_s \right), \\ \omega &= \frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} p_\tau^2 L_m \int_0^t \operatorname{Im}(\bar{i}_s i_r) dt - p_\tau \int_0^t M_c dt \right). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

После подстановки выражений (5) во второе уравнение системы (4) получается уравнение, квадрат которого дает функционал ошибки.

На рисунке показаны результаты эксперимента по определению токов  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$  статора электрической машины, где  $i_s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta}$  (кривая 1), и результаты расчета токов модели с определенными по предложенной методике параметрами (кривая 2).



Идентифицированные параметры машины:  $R_r=1,366$  Ом,  $R_s=3,417$  Ом,  $L_r=388$  мГн,  $L_s=400$  мГн,  $L_m=388$  мГн,  $J=0,0022$  кг·м<sup>2</sup>. Отличие полученных значений от указанных в до-

кументации (справочных) составляет меньше 5 %, лишь только реальное сопротивление ротора больше справочного на 36 %, что может быть связано с незаявленными в справочнике потерями на вихревые токи.

Полученные результаты исследования позволяют сделать вывод о целесообразности использования предложенного алгоритма идентификации в реальных условиях работы электромеханических систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елюков А. С., Водовозов А. М. К вопросу об идентификации линейных динамических систем по результатам экспериментальных исследований // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 2.2 (32). С. 253—256.

2. Копылов И. П. Электрические машины. М.: Высш. школа, 2006.

#### Сведения об авторах

**Александр Михайлович Водовозов** — канд. техн. наук, доцент; Вологодский государственный технический университет, кафедра управляющих и вычислительных систем; E-mail: amv@vstu.edu.ru

**Александр Сергеевич Елюков** — студент; Вологодский государственный технический университет, кафедра управляющих и вычислительных систем; E-mail: aelyukov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
управляющих и вычислительных  
систем

Поступила в редакцию  
01.06.09 г.

УДК 621.372.512.029.33 ; 621.317.741

К. А. Анкудинов, А. И. Анкудинов, Н. С. Акиншин,  
О. А. Глаголев, А. В. Емельянов, В. В. Мануйлов

### СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

На основе математического анализа физических процессов пускового режима работы электропривода предложен способ измерения его электромеханической постоянной времени, технологическим признаком которого является однозначное соотношение времени достижения экстремального значения реакцией апериодического звена и постоянных времени электропривода и апериодического звена. Предложено устройство, реализующие разработанный способ измерения электромеханической постоянной времени электропривода постоянного тока.

**Ключевые слова:** электропривод, электромеханическая постоянная времени, апериодическое звено, передаточная функция.

Известны способы и устройства измерения постоянной времени одиночных экспоненциальных импульсов (ЭИ) [1—3] вида  $u(t) = U \exp(-\alpha_{ЭИ}t) = U \exp(-t/T_{ЭИ})$ , где  $U$  — амплитуда ЭИ,  $\alpha_{ЭИ}$  — коэффициент затухания,  $T_{ЭИ} = 1/\alpha_{ЭИ}$  — постоянная времени ЭИ.

При измерении электромеханических постоянных времени электроприводов постоянного тока возникают сложные сигналы, представляющие собой суперпозицию одиночного ЭИ и постоянной составляющей [4—6]:

$$u_1(t) = U_1 \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + U_0 = U_0 \left[ k \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + 1 \right], \quad (1)$$

где  $U_1$  — амплитуда ЭИ (возникает за счет броска пускового тока электродвигателя — известная величина);  $T_1$  — электромеханическая постоянная времени электропривода (искомая величина);  $U_0$  — постоянная составляющая сигнала (известная величина);  $k = U_1/U_0$  — постоянная величина, в зависимости от типа и мощности электродвигателя имеет значения  $k \in [1, 10]$ .

В настоящей статье рассматривается точный и высокопроизводительный способ измерения постоянной времени  $T_1$  электропривода по времени достижения экстремума выходного сигнала (реакции) апериодического звена (АЗ) первого порядка. Предложено устройство, реализующее разработанный способ.

Рассмотрим математический аппарат предложенного способа. На вход АЗ поступает исследуемый сигнал (1), который после преобразований имеет изображение по Лапласу [7]

$$u_1(s) = U_0 \frac{1 + s(k+1)T_1}{s(1 + sT_1)}, \quad (2)$$

где  $s$  — оператор Лапласа.

Передаточная функция АЗ первого порядка с единичным коэффициентом передачи [8]

$$W(s) = \frac{1}{1 + sT_2}, \quad (3)$$

где  $T_2$  — известная постоянная времени АЗ.

Перемножив выражения (2) и (3), после преобразований получим изображение по Лапласу реакции АЗ:

$$u_2(s) = U_0 \frac{1 + s(k+1)T_1}{s(1 + sT_1)(1 + sT_2)}. \quad (4)$$

Характеристическое уравнение (4) имеет три корня:

$$s_1 = 0; \quad s_2 = -1/T_1; \quad s_3 = -1/T_2. \quad (5)$$

Применив для выражения (4) обратное преобразование Лапласа [7] для всех вариантов корней (5), получим оригиналы реакций АЗ  $u_2(t)$ :

— в общем случае для трех разных корней при  $T_1 \neq T_2$

$$u_2(t) = U_0 \left[ \frac{kT_1}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - \frac{(k+1)T_1 - T_2}{T_1 - T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) + 1 \right]; \quad (6)$$

— для нулевого и двух кратных корней при  $T_1 = T_2 = T$  (в отличие от рассмотренных в работах [4—6])

$$u_2(t) = U_0 \left[ \left( k \frac{t}{T} - 1 \right) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + 1 \right]. \quad (7)$$

Дифференцируя уравнения (6) и (7) по времени  $t$ , получаем выражения для производных от реакции АЗ:

— в общем случае при  $T_1 \neq T_2$

$$\frac{du_2(t)}{dt} = U_0 \left[ \frac{k}{T_2 - T_1} \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_2 - (k+1)T_1}{(T_2 - T_1)T_2} \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right]; \quad (8)$$

— в частном случае (в отличие от работ [4—6]) при  $T_1 = T_2 = T$

$$\frac{du_2(t)}{dt} = \frac{U_0}{T} \left[ 1 + k \left( 1 - \frac{t}{T} \right) \right] \exp\left(-\frac{t}{T}\right). \quad (9)$$

Приравнивая выражения (8) и (9) нулю и решая их относительно  $t$ , находим моменты времени  $t_3$ , в которые реакции АЗ  $u_2(t)$  (формулы (6) и (7)) принимают экстремальные максимальные значения:

— в общем случае при  $T_1 \neq T_2$

$$t_3 = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{k T_2}{(k+1) T_1 - T_2}; \quad (10)$$

— в частном случае (в отличие от работ [4—6]) при  $T_1 = T_2 = T$

$$t_3 = \frac{k+1}{k} T. \quad (11)$$

На рис. 1 представлено семейство зависимостей  $u_2(t)$  АЗ, построенное в соответствии с выражениями (6) и (7) при  $k = 5$ ,  $T_2 = \text{const}$ ,  $U_0 = \text{const}$  и различных соотношениях  $T_1$  и  $T_2$ : кривые 1, 3, 4 и 5 построены по выражению (6) при  $T_1 \neq T_2$ , а кривая 2 — по выражению (7) при  $T_1 = T_2 = T$ . Абсцисса  $t$  оцифрована в значениях постоянной времени  $T_2$  АЗ, а ордината  $u_2(t)$  — в значениях постоянной составляющей  $U_0$ . Зависимости 1, 2 и 3 имеют экстремум и получены при  $T_1 = 2T_2$ ,  $T_1 = T_2$  и  $T_1 = 0,5T_2$  соответственно, а зависимости 4 и 5 — экстремума не имеют и построены при  $T_1 = (1/6)T_2$  и  $T_1 = 0,1T_2$  соответственно.

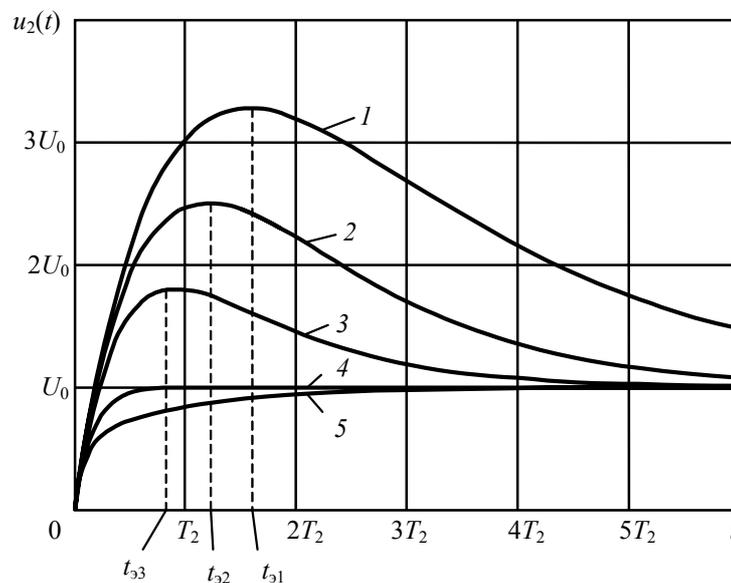


Рис. 1

Как видно из рисунка, сигнал  $u_2(t)$  имеет экстремум не при всех соотношениях  $T_1$  и  $T_2$ . Условие существования экстремума зависимостей определяется положительным значением знаменателя функции под знаком логарифма в выражении (10):

$$T_1 > T_2 / (k+1). \quad (12)$$

Это условие для зависимостей 1—3 выполняется, и они имеют экстремум в моменты времени  $t_{31}$ ,  $t_{32}$  и  $t_{33}$  соответственно, а для зависимостей 4 и 5 условие (12) не выполняется, причем зависимость 4 является критической, так как построена при  $T_1 = T_2 / (k+1) = (1/6)T_2$ .

В отличие от известного способа измерения электромеханической постоянной времени электропривода [4—6] рассмотренный математический аппарат учитывает все возможные варианты соотношений между постоянными времени электропривода и апериодического звена ( $T_1 > T_2$ ,  $T_1 < T_2$  и  $T_1 = T_2$ ), тогда как в работах [4—6] ситуация при  $T_1 = T_2$  не рассматривается.

Анализ семейства зависимостей АЗ (см. рис. 1) позволяет сформулировать суть предложенного способа измерения электромеханической постоянной времени электропривода постоянного тока как последовательность формальных действий следующего алгоритма.

1. Снять с датчика сигнала электродвигателя исследуемый сигнал с измеряемой электромеханической постоянной времени  $T_1$  электропривода [6].

2. Подать данный сигнал (см. п.1) на АЗ первого порядка с единичным коэффициентом передачи и известной с заданной точностью постоянной времени  $T_2$ , определяемой из условия (12), так как ожидаемый диапазон изменения измеряемой величины  $T_1$  всегда известен.

3. Аппаратным путем зафиксировать и измерить время достижения экстремума реакцией АЗ (см. рис. 1), получив в результате  $t_3 = t_{3,и}$ .

4. Рассчитать значение искомой электромеханической постоянной времени  $T_1$  по известным значениям  $t_3 = t_{3,и}$ ,  $k$  и  $T_2$ , для чего решить относительно  $T_1$  одним из численных методов трансцендентное уравнение (10) при  $T_1 \neq T_2$  или линейное уравнение (11) при  $T_1 = T_2 = T$ .

Одним из возможных вариантов реализации предложенного способа измерения постоянной времени  $T_1$  по времени достижения экстремума  $t_{3,и}$  реакцией АЗ является устройство контроля постоянной времени  $T_1$ , функциональная схема которого представлена на рис. 2. Устройство контроля включает: ДС — датчик сигнала, ФИ — формирователь импульсов, АЗ — апериодическое звено первого порядка, МК — микроконтроллер, ИЭ — индикатор экстремума напряжения и ЗИ — знаковый индикатор.

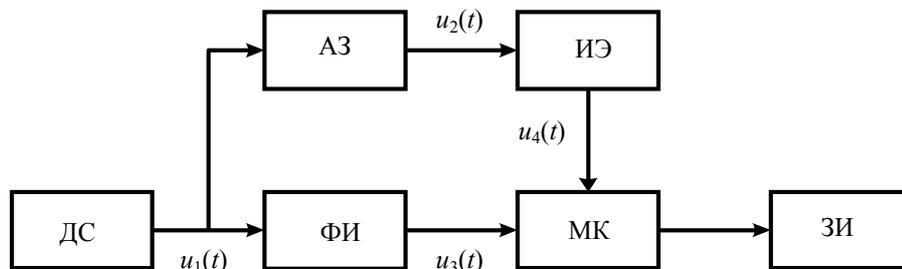


Рис. 2

Датчик сигнала, описанный в работе [6], представляет собой включенное в якорную обмотку электродвигателя активное сопротивление, значение которого на два-три порядка меньше сопротивления обмотки якоря, что исключает влияние ДС на режим работы электропривода. К датчику подключены входы АЗ и ФИ, который состоит из дифференцирующей цепи и усилителя-ограничителя [6]. Выходной сигнал АЗ подается на ИЭ [2, 4, 5]. Для решения трансцендентных уравнений вида (10) в устройстве применен МК фирмы “Atmel” серии ATtiny28L, в котором к портам, настроенным на вход, подключены выходы ФИ и ИЭ, а к портам, настроенным на выход, подключен четырехразрядный семисегментный ЗИ серии АЛС329Б.

Временные диаграммы работы предложенного устройства представлены на рис. 3. В момент времени  $t = 0$  запускается электропривод постоянного тока и сигнал

$u_1(0) = U_1 + U_0 = U_0(k+1)$  поступает с ДС на АЗ и ФИ. На выходе АЗ  $u_2(0) = 0$ , а на выходе ФИ формируется короткий импульс  $u_3(0) = U_{3\max}$ , который подается на первый вход МК, где определяется время достижения реакцией АЗ экстремального значения. При  $t \in (0; t_{э.и})$  сигнал  $u_1(t)$  на выходе ДС уменьшается по экспоненте с постоянной времени  $T_1$ , в пределе стремясь к величине  $U_0$ ; реакция АЗ  $u_2(t)$  аperiodически нарастает, оставаясь меньше экстремального значения  $u_2(t \in (0; t_{э.и})) < U_{2э}$ ; МК осуществляет подсчет и хранение текущего времени достижения реакцией АЗ экстремального значения в SRAM-памяти. При  $t = t_{э.и}$  реакция АЗ принимает экстремальное значение  $u_2(t_{э.и}) = U_{2э}$ , напряжение на выходе ИЭ скачком приобретает значение  $u_4(t_{э.и}) = U_{4\max}$ , а МК прекращает счет времени достижения реакцией АЗ экстремума и запоминает в SRAM-памяти значение времени  $t = t_{э.и}$ . Далее МК рассчитывает по заданному алгоритму искомую величину электромеханической постоянной времени  $T_1$ , которая фиксируется на ЗИ.

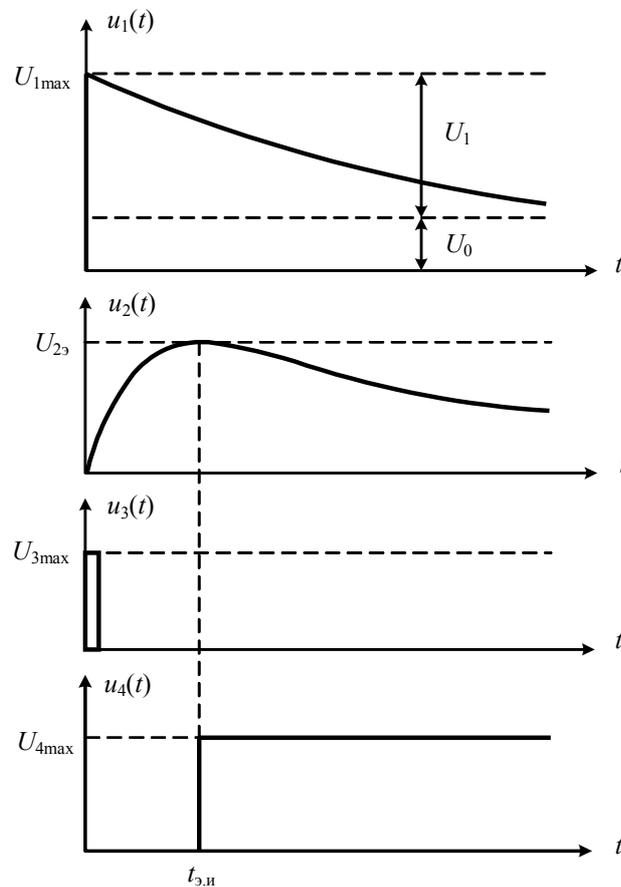


Рис. 3

Обобщенная структурная схема алгоритма работы МК представлена на рис. 4. В блоке 1 осуществляется инициализация МК. В FLASH-память программ заносятся значения  $T_2$ ,  $k$ ,  $\Delta$  и  $\beta$ , где  $\Delta$  — заданная точность численного решения трансцендентного уравнения (10),  $\beta$  — признак расчетного времени достижения экстремума; осуществляется настройка портов на выполнение функций ввода — вывода, выделение в SRAM-памяти данных специальных регистров: измеренного  $t_{э.и}$  и текущего расчетного  $t_{э.р}$  времени достижения экстремумов, текущей расчетной величины электромеханической постоянной времени  $T_{1р}$ , текущих нижнего

$T_{1p,н}$  и верхнего  $T_{1p,в}$  граничных расчетных значений постоянной времени электропривода, текущей расчетной точности  $\Delta_p = T_{1p,в} - T_{1p,н}$  решения трансцендентного уравнения (10).

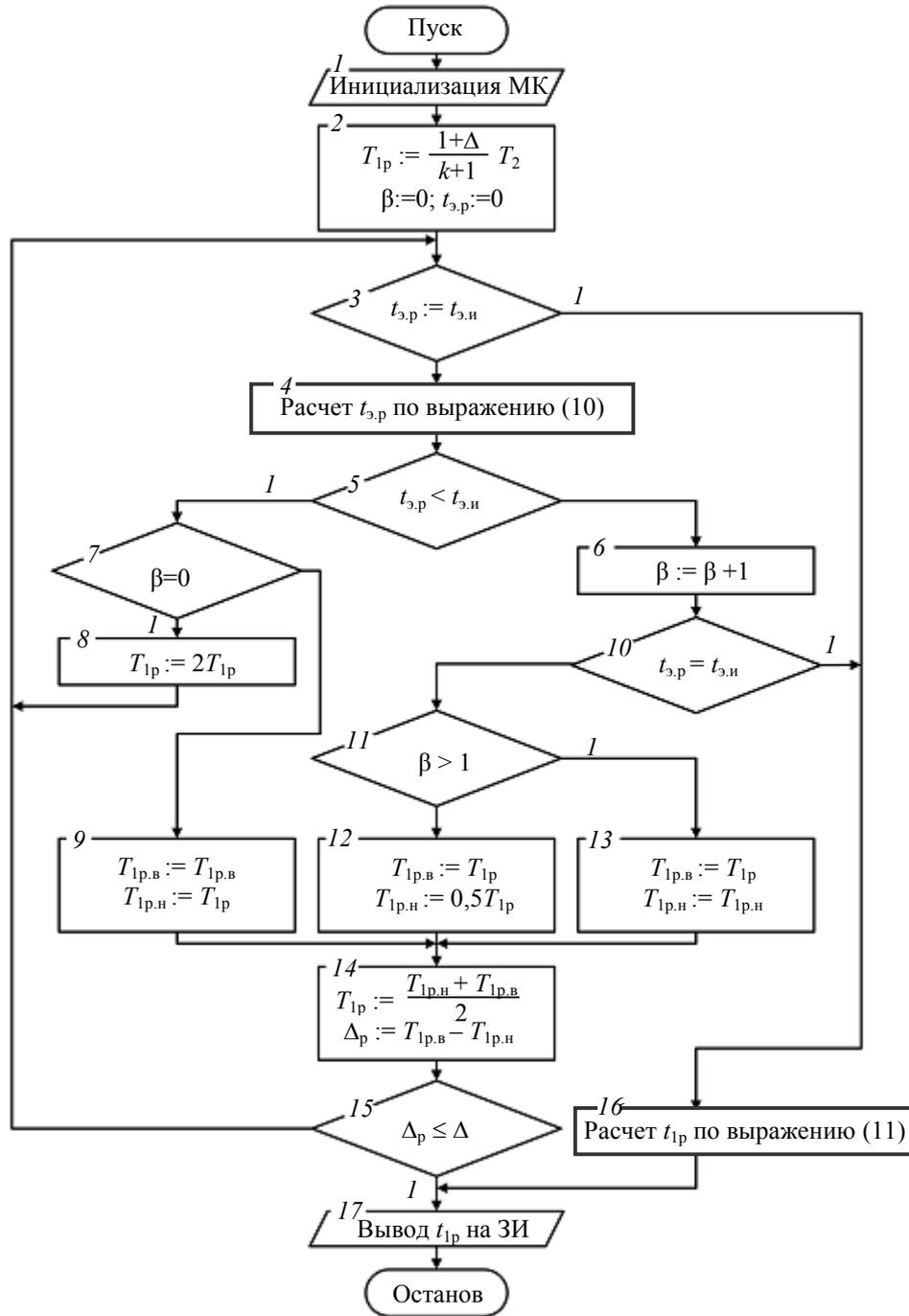


Рис. 4

В блоке 2 задаются начальные значения  $T_{1p} = T_2 \left[ \frac{1 + \Delta}{k + 1} \right]$ ,  $\beta$  и  $t_{э,р}$ . В блоках 3, 5, 7, 10, 11 и 15 выполняется проверка условий, указанных в этих блоках. В блоке 4 по уравнению (10) рассчитывается текущее значение  $t_{э,р}$ . В блоках 8 и 9 задаются текущие значения  $T_{1p}$ ,  $T_{1p,в}$  и  $T_{1p,н}$  при выполнении условия  $t_{э,р} < t_{э,и}$ , а в блоках 12 и 13 — текущие значения  $T_{1p,в}$  и  $T_{1p,н}$  при  $t_{э,р} > t_{э,и}$ . В блоке 14 задаются текущее значение  $T_{1p}$  методом половинного

разбиения, а также значение  $\Delta_p$ . В блоке 16 производится расчет значения  $T_{1p}$  по выражению (11) при  $t_{э,р} = t_{э,и}$ , а в блоке 17 значение  $T_{1p}$  выводится на ЗИ с точностью до 0,01 с.

Предложенный способ измерения электромеханической постоянной времени электропривода и устройство, реализующее этот способ, выгодно отличаются от известных [4—6] благодаря повышению на порядок производительности процесса измерений и обеспечению их достоверности при всех возможных вариантах соотношений постоянных времени электропривода и апериодического звена.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ankudinov A. I., Kravets V. I., Semchenko M. Ya.* Damping factor meter for single exponential radio and video pulses // *Measurement Techniques*. 1988. Vol. 31. P. 776—779.
2. *Анкудинов А. И., Кравец В. И., Семченко М. Я.* Измеритель коэффициента затухания одиночных экспоненциальных радио- и видеоимпульсов // *Измерительная техника*. 1988. № 8. С. 36—37.
3. *Анкудинов А. И., Кравец В. И.* Измерение коэффициента затухания одиночных экспоненциальных видеоимпульсов по реакции резисторно-емкостного четырехполосника // *Изв. вузов СССР. Приборостроение*. 1989. Т. 32, № 1. С. 56—59.
4. *Ankudinov A. I., Kravets V. I., Ankudinov K. A.* Measurement of the electromechanical time constant of DC electric drives // *Measurement Techniques*. 1990. Vol. 33. P. 1229—1231.
5. *Анкудинов А. И., Кравец В. И., Анкудинов К. А.* Измерение электромеханической постоянной времени электропривода постоянного тока // *Измерительная техника*. 1990. № 12. С. 31—32.
6. А. с. 1557633 СССР. Устройство контроля электропривода / *А. И. Анкудинов, В. И. Кравец, М. Я. Семченко и др.* // Б. И. 1990. № 14.
7. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.
8. *Анкудинов А. И., Кравец В. И., Анкудинов К. А.* Искажения фронта и амплитуды экспоненциальных видеоимпульсов электронным усилителем // *Изв. вузов СССР. Приборостроение*. 1990. Т. 33, № 9. С. 59—64.

*Сведения об авторах*

- Константин Александрович Анкудинов** — канд. техн. наук, доцент; Тульский артиллерийский инженерный институт, кафедра радиоэлектронных устройств и систем управления; E-mail: aai\_tula@mail.ru
- Александр Иванович Анкудинов** — канд. техн. наук; Тульский артиллерийский инженерный институт; нач. бюро военно-технической информации
- Николай Степанович Акиншин** — д-р техн. наук, профессор; Тульский артиллерийский инженерный институт; ст. науч. сотр. НИИ
- Олег Анатольевич Глаголев** — канд. техн. наук, доцент; Тульский артиллерийский инженерный институт, кафедра радиолокационного вооружения
- Алексей Владимирович Емельянов** — канд. техн. наук; Тульский артиллерийский инженерный институт, кафедра специального электрооборудования и систем автоматического регулирования
- Владимир Владимирович Мануйлов** — адъюнкт; Тульский артиллерийский инженерный институт, кафедра радиоэлектронных устройств и систем управления

Рекомендована кафедрой  
радиоэлектронных устройств  
и систем управления

Поступила в редакцию  
07.07.08 г.

А. В. МЕДВЕДЕВ, В. А. ЧУЛКОВ

## КОЛЬЦЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСОВ НА ПЛИС

Рассмотрены принципы построения и особенности реализации кольцевых генераторов импульсов на ПЛИС. Оценены технологический разброс частоты импульсов генераторов, ее температурная стабильность и чувствительность к уходу питающего напряжения.

**Ключевые слова:** *кольцевой генератор, частота импульсов, время задержки, элемент задержки, программируемая логическая интегральная схема.*

Успехи в области микроэлектроники стимулировали развитие цифровых измерительных систем, что позволило осуществлять обработку информации непосредственно на кристалле интегральной схемы в соответствии с концепцией „система на кристалле“ (SOC — System on Chip). Благодаря использованию программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) сократились сроки и стоимость разработки таких систем. По сравнению с заказными микросхемами ПЛИС не достигают предельных для данного уровня технологии характеристик, однако обеспечивают исключительную гибкость проектирования.

Один из основных узлов цифровых систем обработки информации — генератор импульсов — выполняется в современных микросхемах по кольцевой схеме в виде замкнутой цепи буферных каскадов, реализующих функции элементов задержки (ЭЗ). Кольцевые генераторы импульсов (КГИ) широко применяются в системах фазовой синхронизации, средствах устранения нарушения синхронизации микропроцессорных систем, быстрых интерполирующих преобразователях время — код и код — время (генераторах задержки) [1]. КГИ можно рассматривать как мультифазный генератор, импульсы множества выходов которого интерполируют его период, сокращая шаг дискретизации времени. Характеристики генератора непосредственно отражаются на точности, стабильности и функциональных возможностях цифровой системы.

Если в заказной микросхеме ЭЗ можно снабдить средствами управления задержкой и, следовательно, осуществить аналоговое регулирование частоты импульсов КГИ, то в ПЛИС такая возможность затруднена ввиду фиксированной структуры вентилях конфигурируемых блоков и ограниченного количества вариантов их соединений. Однако во многих случаях оказывается достаточным дискретное регулирование частоты и фазы импульсов КГИ путем мультиплексирования множества его выходов [2].

Цель настоящей статьи — выяснение условий возбуждения колебаний, а также оценка технологического разброса и стабильности частоты кольцевого генератора импульсов, построенного на кристалле ПЛИС.

Для предотвращения триггерного эффекта в схеме КГИ используется фазоинверсия сигнала обратной связи (рис. 1, *а*). Число  $N$  элементов задержки дифференциального (парафазного) типа может быть произвольным, в то время как при использовании однофазных ЭЗ их число должно быть обязательно нечетным.

Условие возбуждения и поддержания колебаний в схеме генератора состоит в том, чтобы на заданной частоте при фазовом сдвиге прямой ветви, равном  $\pi$ , коэффициент усиления был не менее единицы. Возможны несколько режимов работы схемы (рис. 1, *б*) [3]. Если замкнуть выходы единственного элемента на его противофазные входы, то колебания не возникают вследствие невыполнения условия возбуждения. По мере увеличения количества ЭЗ в схеме общий фазовый сдвиг возрастает, и возникают близкие к гармоническим автоколебания с малой амплитудой при коэффициенте усиления, равном единице. Даль-

нейшее увеличение числа  $N$  элементов приводит к возрастанию времени задержки и коэффициента усиления. Это обуславливает увеличение амплитуды выходного напряжения, при этом форма сигнала приближается к сглаженной трапеции (мягкое ограничение). Наконец, при существенном увеличении числа элементов каждый из них успевает полностью переключаться, амплитуда сигналов достигает максимума, а их форма становится близкой к меандру.

Ориентировочно оценить частоту колебаний КГИ можно, считая задержку каждого каскада равной  $t_D$ . Импульс распространяется через все  $N$  элементов задержки один раз, обеспечивая фазовый сдвиг  $\pi$  в течение полупериода  $Nt_D$ .

После этого импульс инвертируется и второй раз распространяется через те же элементы задержки, что обеспечивает общий период  $2Nt_D$ . Таким образом, частота колебаний оказывается равной

$$f_0 = \frac{1}{2Nt_D}.$$

Цифровое регулирование частоты колебаний КГИ на ПЛИС можно осуществить одним из двух способов: прямым воздействием на частоту путем изменения длины кольца составляющих его ЭЗ и косвенным воздействием на частоту путем направленного перебора выходов КГИ [2].

При использовании первого способа (рис. 2, а) кольцо генератора замыкается через такое количество ЭЗ, которое задается управляющим кодом  $X$  посредством мультиплексора  $MX$ . Частота импульсов определяется приведенным выше выражением. Шаг дискретизации частоты, равный  $1/2N(N+1)t_D$ , можно сократить практически вдвое до значения  $1/2N(2N+1)t_D$ , если дополнить устройство логическим преобразователем управляющего кода [4].

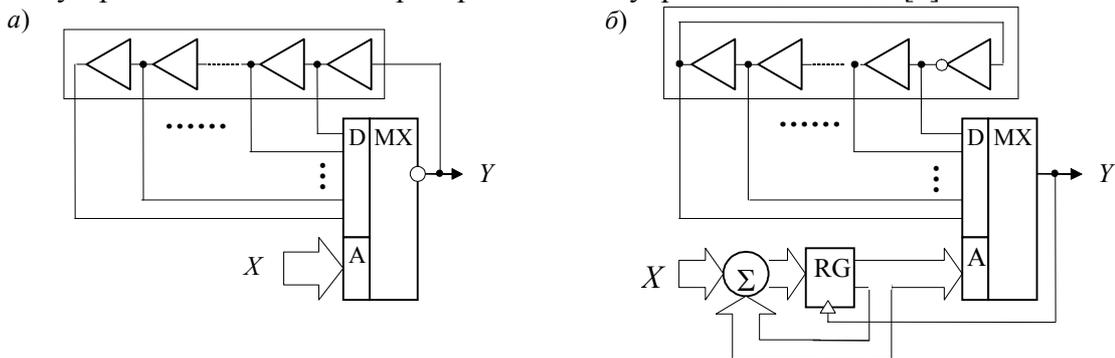


Рис. 2

Согласно второму способу (рис. 2, б) частота кольцевого генератора остается неизменной, однако на выход  $Y$  устройства выводятся сигналы разных фаз КГИ в соответствии с управляющим цифровым кодом на адресном входе мультиплексора. Адресный код формируется аккумулятором (узлом суммирования с обратной связью через регистр  $RG$ ), который на каждом такте работы уменьшает текущий адрес мультиплексора на значение  $X$ . В результате частота импульсов при  $X \ll N$  определяется формулой

$$f = \left(1 - \frac{X}{N}\right) f_0,$$

где  $f_0$  — собственная частота КГИ.

Объектом практического исследования послужила схема КГИ, выполненного на кристаллах ПЛИС EPF10K10LC84-4 и EP2C20F484C7N фирмы “Altera”. Схема состоит из 100 каскадов задержки в виде ячеек LCELL (рис. 3, а), одна из которых снабжена инвертором, обеспечивающим дополнительный сдвиг сигнала обратной связи на  $\pi$ . Размещение компонентов схемы генератора на кристалле и трассировка соединений реализованы в двух версиях: автоматически с помощью компилятора и вручную (на рис. 3, б приведена топология схемы при ручной трассировке на кристалле EP2C20F484C7N).

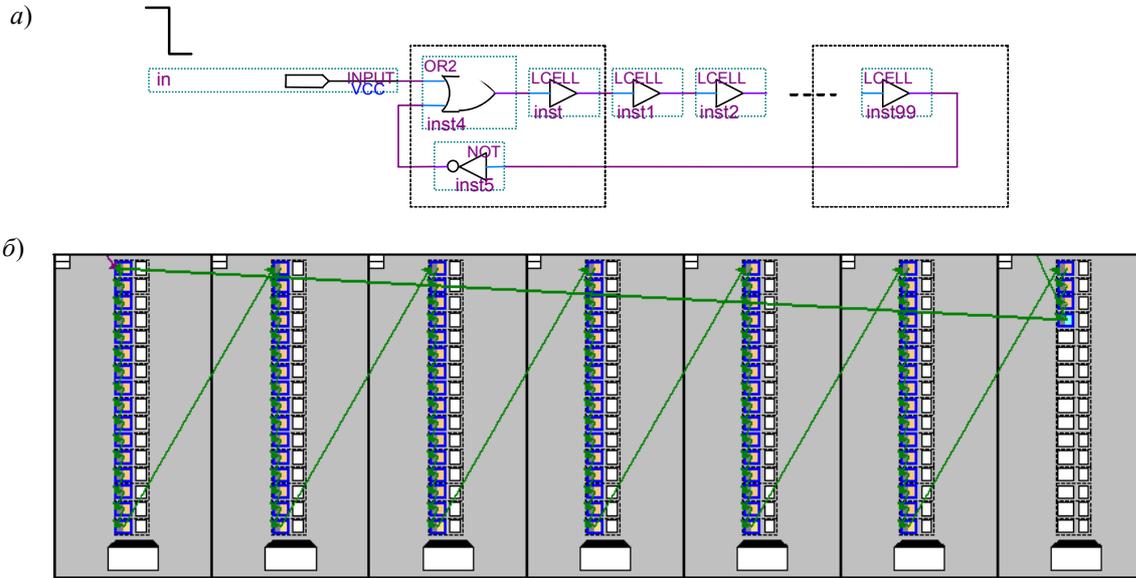


Рис. 3

Частота импульсов генератора, размещенного на кристалле EP2C20F484C7N, составила в среднем 16,5 МГц и имела технологический разброс (среднеквадратическое отклонение по десяти образцам на одном кристалле) 0,278 МГц для устройств, полученных с помощью компилятора, и 0,047 МГц — для устройств, размещение элементов которых и трассировка выполнены вручную. Таким образом, ручной способ позволил существенно сократить технологический разброс частоты, который не превысил  $\pm 1\%$ .

Как было отмечено ранее, частота импульсов кольцевого генератора обратно пропорциональна числу  $N$  его каскадов. Практически важен вопрос о минимальном значении  $N$ , достаточном для возбуждения и поддержания колебаний в КГИ. Для ответа на этот вопрос была измерена частота импульсов кольцевых генераторов на обоих ПЛИС в зависимости от числа каскадов и проверена их работоспособность.

Результаты эксперимента отражены графиками, представленными на рис. 4, а—г. На кристалле EP2C20F484C7N (рис. 4, а) колебания возникают после объединения в кольцо семи буферов задержки, при этом частота импульсов составляет 230 МГц. На кристалле EPF10K10LC84-4 (рис. 4, б) колебания с частотой 192,3 МГц возникают при замыкании инверсной обратной связью двух каскадов.

Далее была проверена стабильность частоты генерируемых импульсов при изменении температуры окружающей среды и питающего напряжения для пяти образцов КГИ на ПЛИС типа EPF10K10LC84-4 (рис. 4, в, каждая из кривых соответствует одному из пяти образцов). Температурный коэффициент частоты составил в среднем  $-0,2\%/^{\circ}\text{C}$ . Работоспособность генератора сохранялась в диапазоне питающего напряжения от 4,75 до 5,25 В (рис. 4, г), при этом чувствительность частоты к уходу напряжения питания не превысила  $8,7\%/V$ . Как видно из графиков, частоты генераторов, выполненных на одном

кристалле, весьма близки, а работа генераторов при изменении температуры и напряжения питания совершенно идентична.

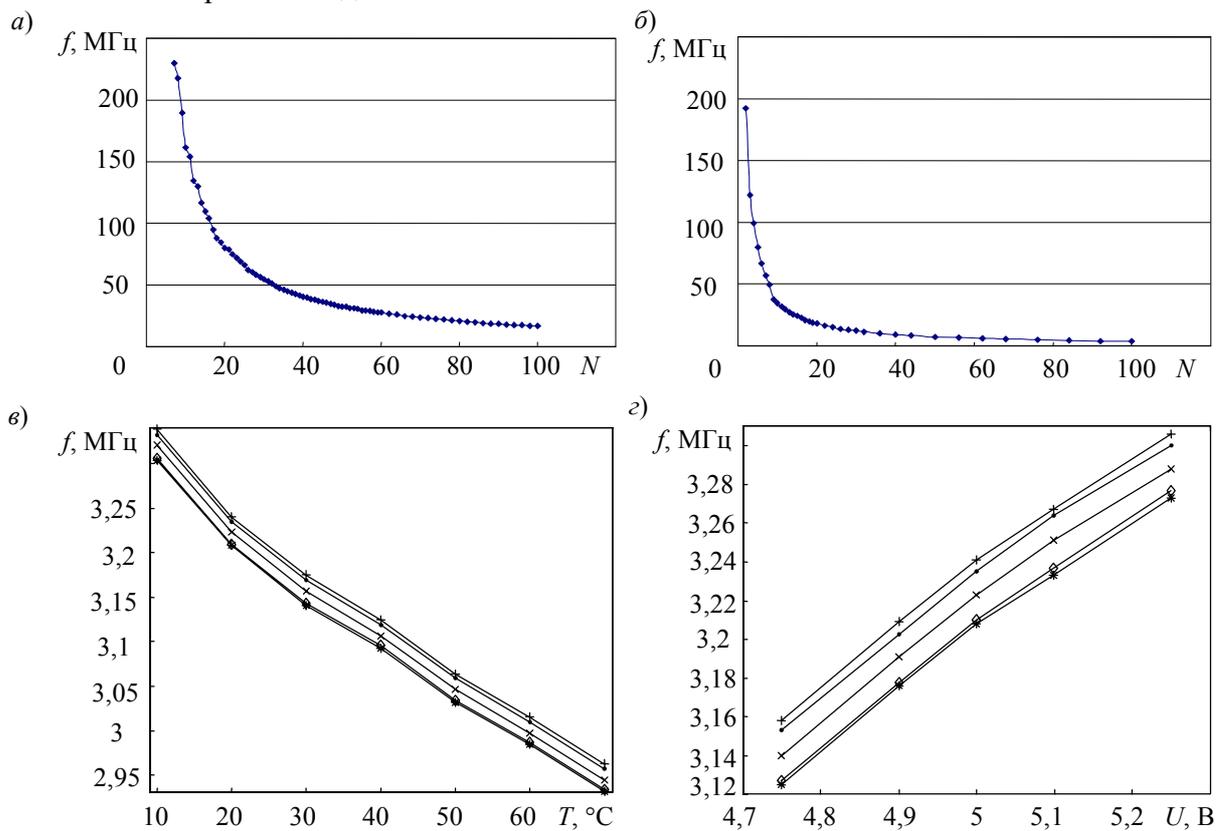


Рис. 4

При построении цифровой системы на кристалле ПЛИС опорный генератор может быть выполнен по кольцевой схеме, число звеньев которой выбирается в соответствии с заданной частотой. Функциональные возможности таких генераторов ограничены, поскольку существуют программные „рамки“ на конфигурацию схемы. Невозможно, например, объединение выходов вентилей с целью интерполяции времени их задержки и сокращения за счет этого шага дискретизации времени. Тем не менее сохраняются возможности цифрового управления генератором при проектировании, например, систем фазовой синхронизации и декодирования данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чулков В. А. Фазовая интерполяция в системах синхронизации и преобразования информации. Пенза: Изд-во Пензен. гос. технол. академии, 2008.
2. Чулков В. А. Генераторы импульсов с селекцией опорной фазы // Радиотехника. 2002. № 10. С. 51—55.
3. Razavi B. A 2-GHz 1.6-mW phase-locked loop // IEEE J. of Solid-State Circuits. 1997. Vol. 32. P. 730—735.
4. Пат. 2170490 РФ. Генератор импульсов с цифровой перестройкой периода / В. А. Чулков.

## Сведения об авторах

- Алексей Владимирович Медведев** — аспирант; Пензенская государственная технологическая академия, кафедра вычислительных машин и систем; E-mail: mav@pgta.ac.ru
- Валерий Александрович Чулков** — канд. техн. наук, доцент; Пензенская государственная технологическая академия, кафедра вычислительных машин и систем, профессор; E-mail: chu@pgta.ac.ru

Рекомендована кафедрой  
вычислительных машин и систем

Поступила в редакцию  
30.12.08 г.

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 535.317

А. Л. СУШКОВ

## ПАРАМЕТРЫ СФЕРОКОНЦЕНТРИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В СФЕРИЧЕСКОЙ И ПРЯМОУГОЛЬНОЙ СИСТЕМАХ КООРДИНАТ

Приведено описание сфероконцентрического распределения показателя преломления в сферической и прямоугольной системах координат. Показана возможность преобразования полинома распределения показателя преломления из сферической системы координат в прямоугольную, что позволяет производить расчет коэффициентов аберраций, а также проводить компьютерное моделирование оптических элементов со сфероконцентрическим градиентом показателя преломления.

*Ключевые слова:* сферическая система координат, прямоугольная система координат, показатель преломления, сфероконцентрический градиент показателя преломления, коэффициенты аберраций.

Сфероконцентрическое распределение показателя преломления (РПП) (определяемое терминами „сферический градиент показателя преломления“, „сферический градиент“) соответствует изменению показателя преломления вдоль радиуса сферы с центром на оптической оси градиентного оптического элемента. Такое распределение можно получить, например, методами ионной диффузии исходной заготовки оптического элемента (ОЭ) со сферической поверхностью или химического послойного осаждения на сферическую поверхность; пример такой градиентной линзы на кристалле Ge / Si приведен в работе [1].

Аберрационный анализ линзы со сфероконцентрическим РПП в области первичных аберраций возможен при переходе из сферической системы координат в прямоугольную.

Впервые сфероконцентрическое РПП было изучено Мэрчандом (Marchand) [2], а основные принципы расчета первичных аберраций при наличии ОЭ со сферическим градиентом показателя преломления сформулированы в работе [3]. Однако некоторые вопросы требуют пояснения, и, кроме того, в расчетах присутствуют неточности, которые необходимо исправить.

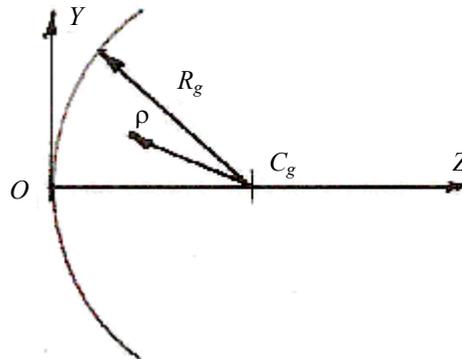
До настоящего времени работа по определению эффективности применения неоднородного показателя преломления концентрировалась вокруг двух видов РПП — радиального и осевого, которые являются частными случаями более общего полинома, описывающего показатель преломления для осесимметричных систем:

$$n(z, \xi) = n_{00} + n_{01}z + n_{02}z^2 + \dots + n_{10}\xi + n_{11}\xi z + n_{12}\xi z^2 + \dots + n_{20}\xi^2 + n_{21}\xi^2 z + n_{22}\xi^2 z^2 + \dots, \quad (1)$$

где  $\xi = x^2 + y^2$ ;  $n_{ij}$  — коэффициенты;  $i, j$  — индексы по  $\xi$  и  $z$ .

Сфероконцентрическое РПП обычно задается полиномами показателя преломления в сферической системе координат.

Геометрическое представление сферического градиента показано на рисунке. Поверхности с одинаковым показателем преломления — сферы с текущим радиусом  $\rho$  с центром в точке  $C_g$  с координатами  $(0, 0, R_g)$  в прямоугольной системе координат  $XOYZ$ . Плоскость  $YOX$  является полярной касательной плоскостью к этой поверхности, ось  $OZ$  — оптическая ось.



Полином показателя преломления в сферической системе координат с центром в точке  $C_g$  имеет вид

$$n(R_g - \rho) = n_{\rho 0} + n_{\rho 1}(R_g - \rho) + n_{\rho 2}(R_g - \rho)^2 + n_{\rho 3}(R_g - \rho)^3 + n_{\rho 4}(R_g - \rho)^4 + \dots, \quad (2)$$

где  $R_g$  — радиус технологической сферы градиентной поверхности линзы;  $\rho$  — текущее значение  $R_g$ ; при  $n(\rho)$  образуется эквирефракционная сферическая поверхность; для упрощения записи обозначим  $R_g = R$ .

При переходе в прямоугольную систему координат уравнение (2) преобразуется к виду

$$(R - \rho) = R - \left[ (R - z)^2 + y^2 + x^2 \right]^{1/2}, \quad (R - \rho) = R - (R^2 - 2Rz + z^2 + \xi)^{1/2}. \quad (3)$$

Если зависимость (3) записать как

$$R - \rho = R \left[ 1 - \left( 1 + \frac{z^2 + \xi - 2Rz}{R^2} \right)^{1/2} \right],$$

то ее можно представить в виде ряда [4]

$$R - \rho = -\frac{z^2 + \xi - 2Rz}{2R} + \frac{(z^2 + \xi - 2Rz)^2}{8R^3} + \dots \quad (4)$$

Полученное разложение в ряд является бесконечно длинным и для практического использования должно быть ограничено.

В качестве критерия точности при переходе от сферической системы координат к прямоугольной принята волновая абберация, возникающая из-за смены системы координат. Она обозначается как OPD и носит название волновой абберации преобразования:

$$\text{OPD} = Rn(R - \rho) - Rn(z, \xi) = R\Delta n,$$

где  $\Delta n$  — разность значений показателя преломления, обусловленная сменой системы координат.

Для уточнения параметров поверхности линзы в работе [3] введено понятие относительного отверстия поверхности  $S = R/2y_{\text{св}}$  (где  $2y_{\text{св}} = D_{\text{св}}$  — световой диаметр поверхности).

С учетом того, что обозначение  $\xi = x^2 + y^2$  в меридиональной плоскости преобразуется в  $\xi = y^2$ , получаем выражение для  $S$  через  $R$  и  $\xi$ :

$$S = \frac{R}{2\sqrt{\xi}},$$

откуда

$$\xi = \frac{R^2}{(2S)^2}. \quad (5)$$

При подстановке выражения (5) в член пятого порядка ряда (4) получим

$$-\frac{7}{256} \frac{\xi^5}{R^9} = -\frac{7R}{262144S^{10}}.$$

Величина волновой aberrации преобразования луча, идущего в направлении градиента, определяется как

$$\text{OPD} = n_{p1} \dot{\eta} \frac{21R}{786432S^{10}},$$

где  $\dot{\eta}$  — глубина зоны градиента.

Произведение  $n_{p1} \dot{\eta}$  составляет перепад значений показателя преломления, который по аналогии с радиальным РПП стекла можно принять равным 0,05.

Тогда, ограничивая волновую aberrацию величиной  $\lambda/10$ , т.е. выполняя требование

$$\text{OPD} = 0,05 \frac{21R}{786432S^{10}} \leq \lambda/10,$$

можно получить условие ограничения относительного отверстия поверхности через величину  $R$ .

При  $\lambda = 0,0005$  мм граничное условие имеет вид

$$R \leq 3,745 \cdot S^{10}.$$

Например, при  $R = 100$  мм имеем  $S \geq 1,389$  или  $D_{\text{св}} \leq R/1,389 \leq 71,99$  мм.

Таким образом, на величину светового диаметра поверхности должно накладываться ограничение, критерием которого является допустимая волновая aberrация OPD.

В общем случае выражение для волновой aberrации преобразования сферической системы координат в прямоугольную имеет следующую запись:

$$\text{OPD}_e = 2,67 \cdot 10^{-5} \Delta n \frac{R}{S^{10}},$$

где  $\text{OPD}_e$  — ошибка, возникающая при смене системы координат.

С целью уменьшения ошибки уравнение (1) было расширено до 9-го порядка, т.е. для  $\xi^k z^m$  сумма степеней  $(2k+m)$  не превышает 9.

Разложение зависимости (3) в ряд до 9-го порядка проведено с помощью программы FORMAC [3]. Результаты приведены в табл. 1—5: в табл. 1 — коэффициенты уравнения (1) в прямоугольной системе координат; в табл. 2—5 представление коэффициентов соответственно при  $n_{p1}$ ,  $n_{p2}$ ,  $n_{p3}$  и  $n_{p4}$  в прямоугольной системе координат.

Таблица 1

$z^m \backslash \xi^k$	$\xi^0$	$\xi^1$	$\xi^2$	$\xi^3$	$\xi^4$
$z^0$	$n_{00}$	$n_{10}$	$n_{20}$	$n_{30}$	$n_{40}$
$z^1$	$n_{01}$	$n_{11}$	$n_{21}$	$n_{31}$	$n_{41}$
$z^2$	$n_{02}$	$n_{12}$	$n_{22}$	$n_{32}$	
$z^3$	$n_{03}$	$n_{13}$	$n_{23}$	$n_{33}$	
$z^4$	$n_{04}$	$n_{14}$	$n_{24}$		
$z^5$	$n_{05}$	$n_{15}$	$n_{25}$		
$z^6$	$n_{06}$	$n_{16}$			
$z^7$	$n_{07}$				
$z^8$	$n_{08}$				
$z^9$	$n_{09}$				

Таблица 2

$z^m \backslash \xi^k$	$\xi^0$	$\xi^1$	$\xi^2$	$\xi^3$	$\xi^4$
$z^0$		$-\frac{1}{2R}$	$\frac{1}{8R^3}$	$-\frac{1}{16R^5}$	$\frac{5}{128R^7}$
$z^1$	1	$-\frac{1}{2R^2}$	$\frac{3}{8R^4}$	$-\frac{5}{16R^6}$	$\frac{35}{128R^8}$
$z^2$		$-\frac{1}{2R^3}$	$\frac{3}{4R^5}$	$-\frac{15}{16R^7}$	
$z^3$		$-\frac{1}{2R^4}$	$\frac{5}{4R^6}$	$-\frac{35}{16R^8}$	
$z^4$		$-\frac{1}{2R^5}$	$\frac{15}{8R^7}$		
$z^5$		$-\frac{1}{2R^6}$	$\frac{21}{8R^8}$		
$z^6$		$-\frac{1}{2R^7}$			
$z^7$		$-\frac{1}{2R^8}$			

Таблица 3

$z^m \backslash \xi^k$	$\xi^0$	$\xi^1$	$\xi^2$	$\xi^3$	$\xi^4$
$z^0$			$\frac{1}{4R^2}$	$-\frac{1}{8R^4}$	$\frac{5}{64R^6}$
$z^1$		$-\frac{1}{R}$	$\frac{3}{4R^3}$	$-\frac{5}{8R^5}$	$\frac{35}{64R^7}$
$z^2$	1	$-\frac{1}{R^2}$	$\frac{3}{2R^4}$	$-\frac{15}{8R^6}$	
$z^3$		$-\frac{1}{R^3}$	$\frac{5}{2R^5}$	$-\frac{35}{8R^7}$	
$z^4$		$-\frac{1}{R^4}$	$\frac{15}{4R^6}$		
$z^5$		$-\frac{1}{R^5}$	$\frac{21}{4R^7}$		
$z^6$		$-\frac{1}{R^6}$			
$z^7$		$-\frac{1}{R^7}$			

Таблица 4

$z^m \backslash \xi^k$	$\xi^0$	$\xi^1$	$\xi^2$	$\xi^3$	$\xi^4$
$z^0$				$-\frac{1}{8R^3}$	$\frac{3}{32R^5}$
$z^1$			$\frac{3}{4R^2}$	$-\frac{3}{4R^4}$	$\frac{45}{64R^6}$
$z^2$		$-\frac{3}{2R}$	$\frac{15}{8R^3}$	$-\frac{39}{16R^5}$	
$z^3$	1	$-\frac{3}{2R^2}$	$\frac{27}{8R^4}$	$-\frac{95}{16R^6}$	
$z^4$		$-\frac{3}{2R^3}$	$\frac{21}{4R^5}$		
$z^5$		$-\frac{3}{2R^4}$	$\frac{15}{2R^6}$		
$z^6$		$-\frac{3}{2R^5}$			
$z^7$		$-\frac{3}{2R^6}$			

Таблица 5

$z^m \backslash \xi^k$	$\xi^0$	$\xi^1$	$\xi^2$	$\xi^3$	$\xi^4$
$z^0$					$\frac{1}{16R^4}$
$z^1$				$-\frac{1}{2R^3}$	$\frac{5}{8R^5}$
$z^2$			$\frac{3}{2R^2}$	$-\frac{9}{4R^4}$	
$z^3$		$-\frac{2}{R}$	$\frac{7}{2R^3}$	$-\frac{25}{4R^5}$	
$z^4$	1	$-\frac{2}{R^2}$	$\frac{6}{R^4}$		
$z^5$		$-\frac{2}{R^3}$	$\frac{9}{R^5}$		
$z^6$		$-\frac{2}{R^4}$			
$z^7$		$-\frac{2}{R^5}$			

Сферический градиент описан распределением показателя преломления

$$n_1(\rho) = n_{\rho 0} + n_{\rho 1}(R - \rho).$$

Согласно данным табл. 2 равноценный градиент в прямоугольной системе координат будет иметь следующую запись:

$$\begin{aligned} n_1(z, \xi) = & n_{\rho 0} + n_{\rho 1}z - n_{\rho 1}\xi \left( \frac{1}{2R} + \frac{z}{2R^2} + \frac{z^2}{2R^3} + \frac{z^3}{2R^4} + \frac{z^4}{2R^5} + \frac{z^5}{2R^6} + \frac{z^6}{2R^7} + \frac{z^7}{2R^8} \right) + \\ & + n_{\rho 1}\xi^2 \left( \frac{1}{8R^3} + \frac{3z}{8R^4} + \frac{3z^2}{4R^5} + \frac{5z^3}{4R^6} + \frac{15z^4}{8R^7} + \frac{21z^5}{8R^8} \right) - n_{\rho 1}\xi^3 \left( \frac{1}{16R^5} + \frac{5z}{16R^6} + \frac{15z^2}{16R^7} + \frac{35z^3}{16R^8} \right) + \\ & + n_{\rho 1}\xi^4 \left( \frac{5}{128R^7} + \frac{35z}{128R^8} \right) + n_{\rho 1}0 \left( \xi^k z^{10-2k} \right), \quad k=0, 1, 2, 3, 4, 5. \end{aligned}$$

Для сферического градиента  $n_2(\rho) = n_{\rho 0} + n_{\rho 4}(R - \rho)^4$  равноценный градиент в прямоугольной системе координат равен (по данным табл. 5)

$$\begin{aligned} n_2(z, \xi) = & n_{\rho 0} + n_{\rho 4}z^4 - 2n_{\rho 4}\xi \left( \frac{1}{R}z^3 + \frac{1}{R^2}z^4 + \frac{1}{R^3}z^5 + \frac{1}{R^4}z^6 + \frac{1}{R^5}z^7 \right) + \\ & + n_{\rho 4}\xi^2 \left( \frac{3}{2R^2}z^2 + \frac{7}{2R^3}z^3 + \frac{6}{R^4}z^4 + \frac{9}{R^5}z^5 \right) + n_{\rho 4}\xi^3 \left( -\frac{1}{2R^3}z - \frac{9}{4R^4}z^2 - \frac{25}{4R^5}z^3 \right) + \\ & + n_{\rho 4}\xi^4 \left( \frac{1}{16R^4} + \frac{5}{8R^5}z \right) + 0 \left( \xi^k z^{10-2k} \right), \quad k=0, 1, 2, 3, 4, 5. \end{aligned}$$

Для градиента  $n_3(\rho) = n_{\rho 0} + n_{\rho 1}(R - \rho) + n_{\rho 4}(R - \rho)^4$  равноценный градиент в прямоугольной системе координат равен сумме двух градиентов минус  $n_{\rho 0}$ :

$$n_3(z, \xi) = n_1(z, \xi) + n_2(z, \xi) - n_{\rho 0},$$

т.е.

$$\begin{aligned} n_3(z, \xi) = & n_{\rho 0} + n_{\rho 1}z + n_{\rho 4}z^4 - \xi \left( \frac{n_{\rho 1}}{2R} + \frac{n_{\rho 1}}{2R^2}z + \frac{n_{\rho 1}}{2R^3}z^2 + \left( \frac{n_{\rho 1}}{2R^4} + \frac{2n_{\rho 4}}{R} \right) z^3 + \dots \right) + \\ & + \xi^2 \left( \frac{n_{\rho 1}}{8R^3} + \frac{3n_{\rho 1}}{8R^4}z + \left( \frac{3n_{\rho 1}}{4R^5} + \frac{3n_{\rho 4}}{2R^2} \right) z^2 + \dots \right) + \xi^3(\dots) + \xi^4(\dots). \end{aligned}$$

В области аббераций третьего порядка запись РПП ограничивается степенями для  $\xi$  и  $z$ , не превышающими 2.

Например, исходное сферическое РПП

$$n(R - \rho) = n_{\rho 0} + n_{\rho 1}(R - \rho)$$

при переходе к прямоугольной системе координат можно записать как

$$n_1(z, \xi) = n_{\rho 0} + n_{\rho 1}z - n_{\rho 1}\xi \left( \frac{1}{2R} + \frac{z}{2R^2} \right) + n_{\rho 1}\xi^2 \left( \frac{1}{8R^3} + \frac{3z}{8R^4} \right).$$

В меридиональной плоскости имеем

$$n_1(z, y^2) = n_{p0} + n_{p1}z - n_{p1}y^2 \left( \frac{1}{2R} + \frac{z}{2R^2} \right) + n_{p1}y^4 \left( \frac{1}{8R^3} + \frac{3z}{8R^4} \right).$$

Рассмотренный математический аппарат позволяет осуществить математическое моделирование оптических элементов со сферическим градиентом показателя преломления в области аббераций третьего порядка, а также компьютерное моделирование оптических систем с градиентными элементами с помощью программных комплексов (например, "OPAL-PC"), в которых неоднородный показатель преломления описывается в декартовой системе координат.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Howard J. W., Ryan-Howard D. P. Optical design of thermal imaging systems utilizing gradient-index optical materials // Opt. Eng. 1985. Vol. 24, N. 2. P. 263—266.
2. Marchand E. W. Ray tracing in gradient – index media // J. Opt. Soc. Amer. 1970. Vol. 60, N. 1. P. 1—6.
3. Fantone S. D. Optical design with spherical index gradients // Appl. Opt. 1983. Vol. 22, N. 12.
4. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1983.

#### *Сведения об авторе*

**Александр Леонидович Сушков**

— канд. техн. наук, доцент; Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, кафедра оптико-электронных приборов научных исследований; E-mail: ale-sushkov@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов  
научных исследований

Поступила в редакцию  
25.03.08 г.

С. Ю. СТРАХОВ

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛАЗЕРОВ

Рассматриваются вопросы применения комплексных критериев эффективности при проектировании и эксплуатации мощных лазеров. Одним из возможных критериев является интенсивность излучения лазера в дальней зоне. В качестве практических примеров использования этого критерия рассматриваются структурно-параметрическая оптимизация неустойчивого резонатора мощного газодинамического лазера и оптимальные режимные параметры для импульсного твердотельного лазера.

**Ключевые слова:** критерий эффективности, неустойчивый резонатор, дальняя зона, угол расходимости, газодинамический лазер, твердотельный лазер.

Современная лазерная система является сложным техническим объектом, эффективность которого определяется рядом выходных параметров и эксплуатационных характеристик. Для количественного определения эффективности используются специальные критерии. Критерием эффективности может быть как один наиболее важный выходной параметр или эксплуатационная характеристика объекта, так и совокупность нескольких значимых выходных параметров и (или) эксплуатационных характеристик. В последнем случае следует говорить о комплексном критерии эффективности.

В настоящей статье рассматривается вопрос использования комплексного критерия эффективности при разработке и эксплуатации мощных лазеров для силового (термического, эрозионного) воздействия на объект. Основная задача этих лазеров — создание максимальной интенсивности на объекте воздействия. Отсюда понятно, что интенсивность излучения (или величина, ей пропорциональная) может являться критерием эффективности.

В ряде случаев задача фокусировки излучения решается совместно с задачей его транспортировки на значительные расстояния. Взаимодействие излучения с объектом происходит в дальней зоне (зоне дифракции Фраунгофера), где интенсивность определяется двумя выходными параметрами лазера — мощностью  $P$  (или энергией) излучения и углом расходимости  $\theta$  — и количественно характеризуется комплексным критерием вида  $P/\theta^2$ . Угол расходимости определяется длиной волны излучения, формой и размером апертуры оптического резонатора или системы формирования излучения, внутрирезонаторными aberrациями и aberrациями формирующей оптики.

Критерий  $P/\theta^2$  имеет смысл использовать для оценки эффективности лазеров с неустойчивым резонатором (НР) или с устойчивым резонатором, число Френеля которого  $N_F < 10$ . Для лазеров с устойчивым резонатором при больших числах Френеля в качестве критерия эффективности обычно следует использовать мощность излучения, не учитывая угол расходимости. Это обусловлено тем, что подобные резонаторы в составе лазерных систем высокой мощности могут применяться лишь при отладке и оптимизации энергетических характеристик активной среды (АС) и не применяются в задачах, требующих малой угловой расходимости.

Рассмотрим пример практического использования критерия эффективности  $P/\theta^2$  при разработке неустойчивого резонатора для мощного газодинамического  $\text{CO}_2$ -лазера (ГДЛ), активная среда которого образуется при сгорании твердого или жидкого топлива и последующем прохождении продуктов сгорания толуола в воздухе через блок плоских сопел [1].

Суммарный расход продуктов сгорания 16 кг/с. Размер критического сечения сопла 0,35 мм, степень расширения 32. Вывод рабочего тела осуществлялся через прямоугольный диффузор в атмосферу. Размер поперечного сечения АС определялся длиной соплового блока и распределением коэффициента усиления вниз по газовому потоку: 1200×120×120 мм. С учетом суммарного расхода продуктов сгорания и характерного для таких ГДЛ энергосъема, составляющего примерно 5 Дж/г, мощность излучения составляет около 80 кВт.

На стадии разработки лазера рассматривались три варианта неустойчивого резонатора: однопроходный, двухпроходный и трехпроходный ( $z$ -образный). Резонаторы с большим числом проходов не рассматривались, так как их использование связано с усложнением конструкции юстировочных узлов, уменьшением апертуры зеркал и, как следствие, с возрастанием интенсивности излучения на них. На рис. 1,  $a$ — $в$  представлены схемы компоновки однопроходного ( $a$ ), двухпроходного ( $б$ ) и трехпроходного ( $в$ ) резонаторов; здесь 1 — выпуклое (выходное) сферическое зеркало (радиус кривизны  $R_1$ ), 2 — вогнутое сферическое зеркало (радиус кривизны  $R_2$ ), 3 — плоское зеркало, 4 — угловой отражатель. Значения основных параметров резонаторов приведены в таблице, где  $L_p$  — длина резонатора (расстояние между конечными зеркалами вдоль оптической оси),  $L_{AC}$  — протяженность активной среды вдоль оси резонатора,  $\beta$  — суммарные относительные потери мощности излучения в резонаторе за полный проход.

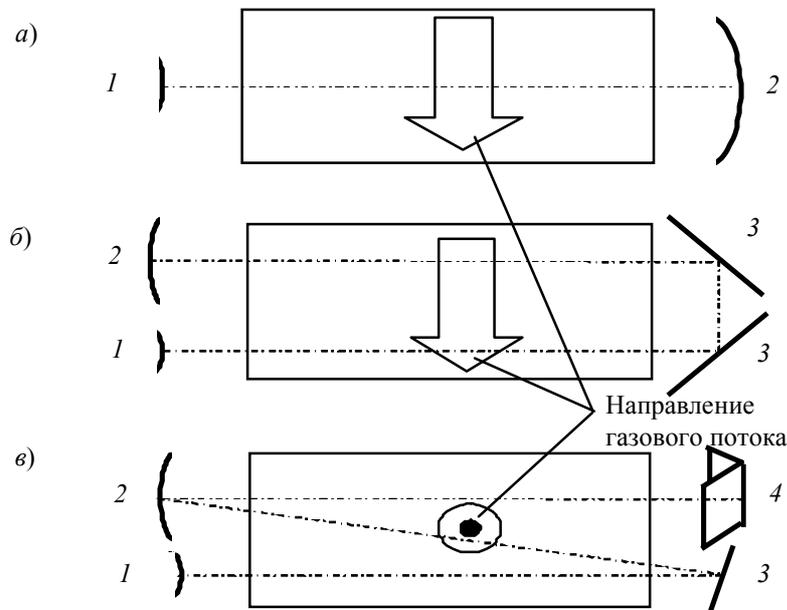


Рис. 1

Тип резонатора	Размер апертуры, мм	$L_{AC}$ , мм	$L_p$ , мм	$\beta$
Однопроходный	150×110	1200	1700	0,03
Двухпроходный	60×110	2400	3400	0,09
Трехпроходный	60×110	3000	5100	0,12

Все три возможных варианта резонатора относятся к конфокальным неустойчивым резонаторам, лазерные пучки внутри которых не имеют перетяжки, и соответственно отсутствует область высокой плотности излучения, что важно для мощных лазеров.

Вследствие особенностей формирования АС ГДЛ возникает неравномерное распределение коэффициента усиления слабого сигнала вниз по газовому потоку: за срезом соплового блока коэффициент усиления максимальный, а вниз по потоку он снижается [2]. Для компен-

сацией такой неравномерности в конфокальных резонаторах можно использовать так называемые резонаторы с вращением электромагнитного поля [2].

Реализация вращения электромагнитного поля на  $180^\circ$  в однопроходном резонаторе связана с использованием прозрачной в спектральном диапазоне работы лазера призмы-крыши со сферическим основанием, которая одновременно выполняет роль вогнутого зеркала резонатора [2]. Однако применение таких призм в мощных ГДЛ связано с рядом трудностей: во-первых, изготовление крупногабаритной призмы (со световой апертурой  $150 \times 110$  мм) из селенида цинка или другого материала, прозрачного при излучении с длиной волны  $10,6$  мкм, технологически сложно и дорого; во-вторых, при высокой мощности излучения в призме будут возникать тепловые деформации, что может привести к разрушению призмы. В этой связи реализация в однопроходном резонаторе вращения электромагнитного поля нецелесообразна, и поэтому рассматривался классический однопроходный резонатор.

В двухпроходном резонаторе для ГДЛ реализовать вращение электромагнитного поля можно с помощью уголкового отражателя (двух плоских зеркал, расположенных под углом  $90^\circ$ ), каждая из граней которого является отдельным плоским зеркалом резонатора (см. рис. 1, б). В этом случае двухпроходная схема также представляет собой классический телескопический резонатор со сферическими концевыми зеркалами.

Для однопроходной и двухпроходной схем радиусы кривизны концевых зеркал определяются соотношениями

$$R_1 = \frac{2L_p}{M-1}; \quad R_2 = \frac{2ML_p}{M-1},$$

где  $M$  — коэффициент увеличения резонатора.

В трехпроходной схеме вращение электромагнитного поля также реализуется с помощью уголкового отражателя. Ось резонатора проходит через ребро уголкового отражателя, которое разделяет апертуру лазерного пучка на две симметричные части. В такой схеме уголкового отражателя является концевым зеркалом резонатора, а вогнутое сферическое зеркало, обеспечивающее параллельность пучка на выходе из резонатора, занимает промежуточное положение. По сути данный резонатор эквивалентен конфокальному телескопическому резонатору. Радиусы кривизны зеркал такого резонатора определяются из соотношений, которые можно вывести, записав лучевую матрицу резонатора [2] и условия параллельности лучей на выходе из него:

$$R_1(M+1) - R_2 + 4L_p = 0, \quad 4LR_2 + 4L_pMR_1 - R_1R_2(M-1) = 0.$$

Расчет резонатора осуществлялся на основе известного соотношения [3]

$$P = \frac{I_s t S}{2} \frac{2k_0 L_{AC} + \ln(1-t-\beta)}{-\ln(1-t-\beta)}, \quad (1)$$

где  $k_0$  — средний по объему среды коэффициент усиления слабого сигнала;  $t$  — коэффициент пропускания выходного сигнала;  $S$  — площадь поперечного сечения лазерного пучка внутри резонатора перед выходным зеркалом;  $I_s$  — интенсивность насыщения АС.

Значение коэффициента  $k_0$  определялось экспериментально по усилению излучения вспомогательного электроразрядного  $\text{CO}_2$ -лазера, прошедшего через АС, и составило примерно  $0,5 \text{ м}^{-1}$ . Значение  $I_s$  определялось из соотношения (1) по данным эксперимента, в котором в качестве выходного использовалось зеркало из селенида цинка; в этом эксперименте все параметры, входящие в формулу (1), кроме  $I_s$ , были известны, в результате получено:  $I_s \approx 1 \text{ кВт/см}^2$ .

Протяженность  $L_{AC}$  АС вдоль оси резонатора зависит от его схемы и для однопроходного и двухпроходного резонаторов равняется соответственно одной и двум длинам соплового блока. Для трехпроходного резонатора величина  $L_{AC}$  принималась равной 3000 мм, так как в процессе третьего прохода через резонатор излучение распространяется по уже „обедненной“ предыдущими проходами активной среде.

Суммарные внутрирезонаторные потери  $\beta$  определялись как произведение потерь мощности при однократном отражении от зеркала (для медных зеркал эта величина составляет 0,015 или 1,5 %) на число отражений в процессе полного прохода через резонатор (в обе стороны). Значения  $\beta$  для разных схем резонаторов представлены в таблице.

Для определения коэффициента  $t$  использовалась формула, учитывающая его связь с коэффициентом увеличения  $M$ :

$$t = 1 - \frac{1}{M^2}.$$

Угол расходимости излучения лазера оценивался с помощью выражения [4]

$$\theta = 2 \frac{\lambda}{D} \frac{M}{M-1}, \quad (2)$$

где  $D$  — размер излучающей апертуры,  $\lambda = 10,6$  мкм — длина волны излучения.

Тогда критерий эффективности — средняя интенсивность излучения в дальней зоне (при фокусном расстоянии  $f$  фокусирующей системы) — будет определяться выражением

$$I = \frac{4P}{\pi[f\theta]^2} = - \frac{I_s \left(1 - \frac{1}{M^2}\right) S \cdot 2k_0 L_{AC} + \ln\left(\frac{1}{M^2} - \beta\right)}{2 \left(\frac{M}{M-1}\right)^2 \ln\left(\frac{1}{M^2} - \beta\right)} \frac{D^2}{\pi(f\lambda)^2}.$$

Величины  $f$  и  $D$  определяются системой формирования и фокусировки излучения на объекте воздействия и могут варьироваться вне зависимости от резонатора. Поэтому в целевой функции для оптимизации резонатора эти параметры, а также неизменные величины — длину волны излучения и интенсивность насыщения АС — можно исключить, т.е. в качестве целевой функции следует рассматривать величину

$$I' = - \left(1 - \frac{1}{M^2}\right) S \frac{2k_0 L_{AC} + \ln\left(\frac{1}{M^2} - \beta\right)}{\left(\frac{M}{M-1}\right)^2 \ln\left(\frac{1}{M^2} - \beta\right)}.$$

На рис. 2, а, б представлены графики зависимости мощности излучения и критерия эффективности от коэффициента увеличения для одно-, двух- и трехпроходного резонаторов (кривые 1—3 соответственно). Как видно из графиков, оптимальной по мощности является однопроходная схема при  $M=1,1$ . В этом случае мощность излучения достигает 110 кВт. Очевидно, что такой коэффициент увеличения для неустойчивого резонатора неприемлем вследствие сильной чувствительности к абберациям и высокой угловой расходимости излучения. Для оптимизации по критерию  $I'$ , учитывающему как мощность, так и расходимость лазерного излучения, наилучшим вариантом является трехпроходный резонатор, имеющий коэффициент увеличения  $M=1,6 \dots 1,8$ .

В результате эксперимента была выбрана схема трехпроходного резонатора с уголковым отражателем для вращения электромагнитного поля и с коэффициентом увеличения 1,8. В экспериментах использовался также устойчивый резонатор (УР), построенный по трехпро-

ходной схеме, в котором в качестве выходного использовалось полупрозрачное зеркало из селенида цинка ( $t=0,5$ ), концевое полностью отражающее зеркало было вогнутым сферическим с радиусом кривизны  $R=25$  м (вместо уголкового отражателя в НР), а диагональные зеркала — плоскими.

На рис. 2, а представлены данные экспериментов по выбранному неустойчивому резонатору, а также на графике нанесены точки, соответствующие измеренной мощности излучения устойчивого резонатора. В ходе экспериментов средняя мощность излучения определялась при пуске лазера (продолжительностью 2—4 с) с помощью водоохлаждаемого калориметра. Как видно из рисунка, результаты эксперимента достаточно хорошо согласуются с расчетными данными.

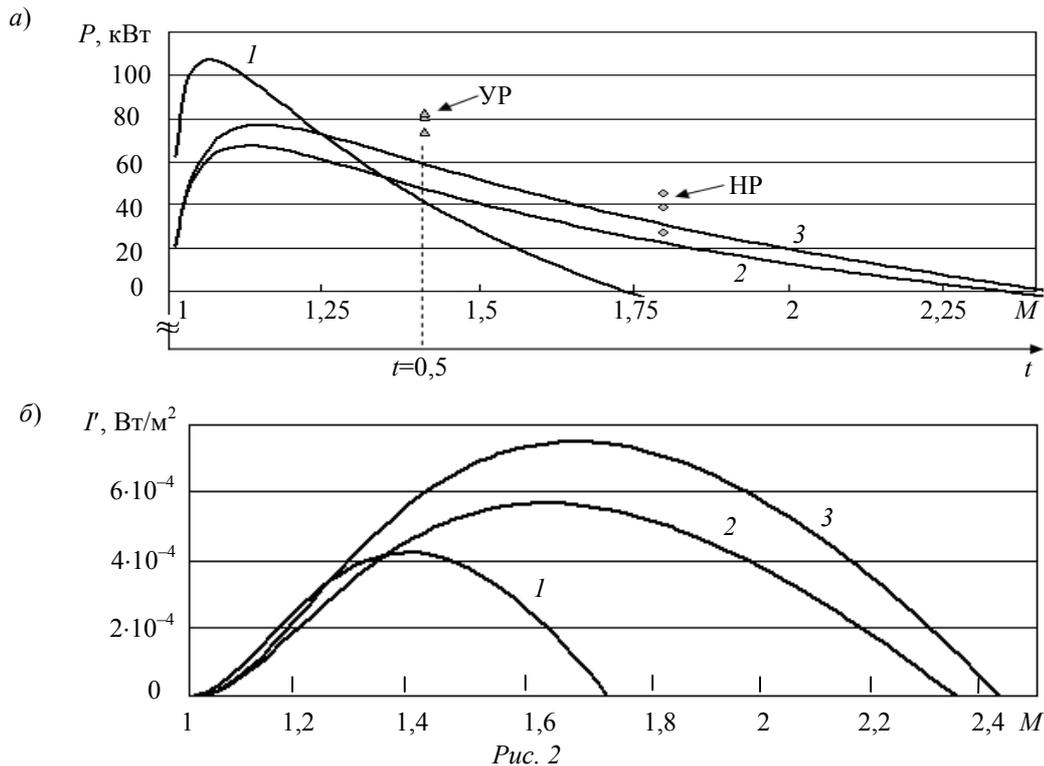


Рис. 2

Для экспериментального измерения угла расходимости излучения часть мощности лазерного пучка (порядка 4 %) отводилась с помощью делительного клина на сферическое зеркало ( $f=1000$  мм), фокусирующее излучение на металлическую пластину. По отношению диаметра отверстия прожога в пластине к фокусному расстоянию зеркала определялся угол расходимости излучения. Измеренный таким образом угол расходимости излучения НР составил порядка 1—2 мрад, что примерно в 2—3 раза больше дифракционной расходимости, определяемой по формуле (2). Это отличие связано с внутррезонаторными aberrациями, возникающими при работе лазера, — термодформацией зеркал и неоднородностью показателя преломления АС. В этой связи выбор НР с максимальным коэффициентом увеличения является еще более оправданным, так как при этом снижается чувствительность резонатора к aberrациям.

Другим примером использования критерия эффективности  $P/\theta^2$  является режимно-параметрическая оптимизация импульсного твердотельного лазера. В состав конструкции лазера входят активный элемент из неодимового стекла ГЛС-22  $\varnothing 45 \times 913$  мм, четырехламповый осветитель и неустойчивый конфокальный резонатор с коэффициентом увеличения 2. Основной режимный параметр работы лазера — энергия накачки  $E_n$ , которая регулировалась напряжением зарядки конденсаторных батарей, питающих импульсные лампы накачки. При изменении энергии накачки пропорционально меняется и энергия излучения  $E_{из}$ .

Достижение максимальной яркости и интенсивности излучения в дальней зоне обеспечивается при максимуме критерия  $E_n/\theta^2$ . В процессе экспериментальной оптимизации одновременно с измерением энергии импульсов лазерного излучения с помощью прибора ИМО-3 проводилось измерение угла расходимости излучения. Для этого часть энергии излучения с помощью светоделителя отводилась на вогнутое зеркало с фокусным расстоянием 5000 мм. В фокусе зеркала последовательно устанавливались калиброванные диафрагмы различного диаметра, за которыми находился измеритель энергии излучения. По экспериментальному графику зависимости энергии излучения (измеряемой за диафрагмой) от диаметра диафрагмы определялась угловая расходимость излучения.

На рис. 3 представлены зависимости угла расходимости  $\theta$  (кривая 1), энергии излучения  $E_n$  (кривая 2) и критерия эффективности  $E_n/\theta^2$  (кривая 3) от энергии накачки  $E_n$ . Как видно из графика, расходимость излучения на порядок превышает дифракционную, что связано с существенными термооптическими aberrациями АС лазера [5]. Причем с увеличением энергии накачки уровень таких aberrаций, а следовательно, и угол расходимости возрастает. Из графика также следует, что существует оптимальная энергия накачки, при которой интенсивность излучения в дальней зоне будет максимальна. Высокое значение  $E_n$  объясняется тем, что в данном случае в составе резонатора использовался активный элемент из фосфатного стекла ГЛС-22 с улучшенными термооптическими характеристиками.

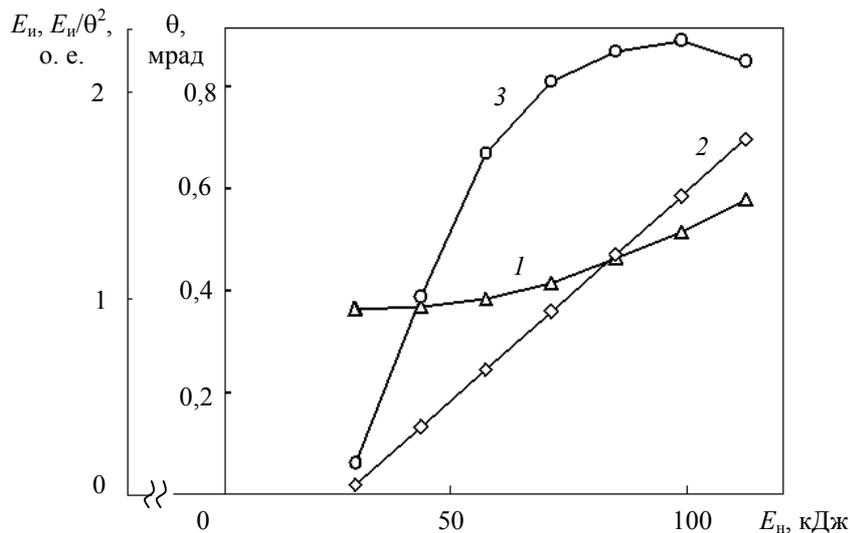


Рис. 3

Таким образом, использование комплексных критериев эффективности позволяет осуществлять структурную и режимно-параметрическую оптимизацию лазерных систем как на стадии проектирования, так и в процессе их эксплуатации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борейшо А. С., Леонов А. Ф., Страхов С. Ю., Трилис А. В. Особенности формирования излучения в резонаторах с перфорированными зеркалами // Квантовая электроника. 2003. Т. 33, № 2. С. 177—180.
2. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979.
3. Лосев С. А. Газодинамические лазеры. М.: Наука, 1977.
4. Технологические лазеры. Справочник / Под ред. Г. А. Абельситова. М.: Машиностроение, 1991.
5. Лобачев В. В., Страхов С. Ю. Оптимальные режимы функционирования цилиндрических активных элементов в лазерах на неодимовом стекле // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. Т. 42, № 5—6. С. 48—54.

Сергей Юрьевич Страхов

*Сведения об авторе*

— канд. физ.-мат. наук, доцент; Балтийский государственный технический университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра лазерной техники; E-mail: Strakhov\_s@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
лазерной техники

Поступила в редакцию  
16.02.09 г.

УДК 681.7.068: 535.215

П. С. ЛОПАТИНА, В. В. КРИШТОП

## ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Рассматриваются электрооптические свойства кристалла ниобата лития. Представлена схема экспериментальной установки электрооптического модулятора, основанного на эффекте Поккельса. Приведена методика исследования модулятора с помощью коноскопических фигур и проанализированы его основные характеристики на длинах волн 0,85 и 1,3 мкм.

**Ключевые слова:** электрооптический модулятор, эффект Поккельса, кристалл ниобата лития, коноскопическая фигура, волоконно-оптические линии связи.

Быстрое развитие систем связи обуславливает необходимость модернизации и совершенствования оборудования линейных трактов. Модулирующие устройства являются одним из важнейших элементов линий связи.

В настоящей статье рассматривается электрооптический модулятор, основанный на поперечном эффекте Поккельса. Эффект Поккельса заключается в изменении показателя преломления кристалла, причем это изменение пропорционально напряженности внешнего электрического поля [1, 2]:

$$n_0(E) = n_0 + r_{\Pi} E,$$

где  $r_{\Pi}$  — электрооптический коэффициент;  $E$  — напряженность электрического поля;  $n_0$  — показатель преломления кристалла при отсутствии электрического поля.

В соответствии со взаимной ориентацией направления распространения луча вдоль оптической оси  $z$  и напряженности электрического поля  $E$  различают продольный и поперечный эффекты Поккельса.

В настоящее время электрооптические модуляторы строятся в основном на основе кристалла ниобата лития, диапазон прозрачности которого составляет 0,4—5 мкм.

Благодаря электрооптическим свойствам этих кристаллов для управления лазерным лучом можно использовать как поперечные, так и продольные управляющие поля. На практике наиболее распространен случай, когда электрическое поле направлено вдоль оси  $y$ , а свет — вдоль оптической оси  $z$ . При этом вследствие поперечного эффекта Поккельса и значительных изменений показателей преломления можно получить весьма низкие управляющие напряжения.

Это свойство кристалла ниобата лития используется в экспериментальной установке, внешний вид которой представлен на рис. 1. В состав установки входят гониометр, на котором закреплены лазер ГН-5 с поляризатором и камера с фотодиодом ФД24К; цифровой

мультиметр АМ-1097 для регистрации значения тока с фотодиода; тефлоновый столик, на котором закрепляется высоковольтный кристаллодержатель с медными электродами, и блок питания ВИП-30.



Рис. 1

Для исследования оптических свойств модулятора применен метод наблюдения коноскопических фигур [3]. При этом вместо камеры с фотодиодом устанавливается экран, на который проецируются коноскопические фигуры, а перед кристаллом — рассеивающее стекло. Оптическая схема измерений представлена на рис. 2, где 1 — лазер; 2 — поляризатор; 3 — матовое рассеивающее стекло; 4 — электрооптический кристалл; 5 — металлические электроды; 6 — высоковольтный источник; 7 — анализатор; 8 — собирающая линза; 9 — экран.

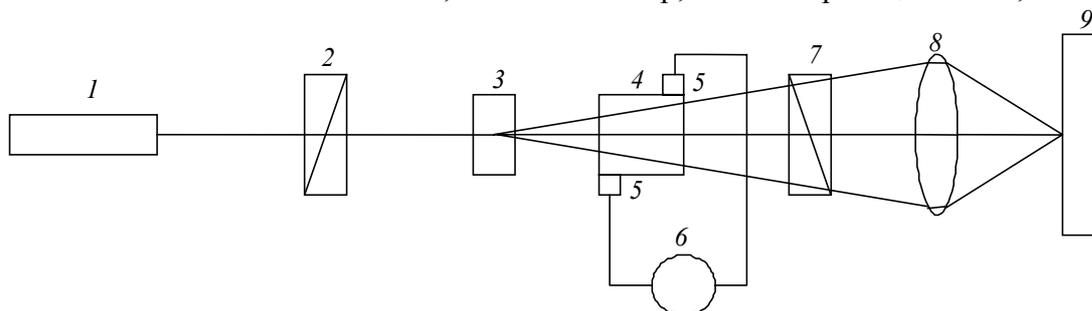


Рис. 2

Для анализа коноскопических фигур применена методика обработки изображений с использованием цифровой фотокамеры [4]. Изображение с экрана фиксируется цифровой камерой, затем переносится в компьютер и обрабатывается с помощью специальной программы „Экспресс-анализ диффузных оптических изображений“, созданной на кафедре физики Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Хабаровск). Эта программа предназначена для построения графика зависимости интенсивности излучения по любым выбранным направлениям оптического изображения [5].

В результате экспериментальных исследований были получены коноскопические картины и графики распределения интенсивности света для кристалла ниобата лития. На рис. 3 представлена динамика изменения коноскопической картины при увеличении напряжения  $U$ , а на рис. 4 — графики распределения интенсивности света в горизонтальной плоскости коноскопических картин при различных напряжениях для относительной координаты ( $x_{\text{отн}}$ ) точки.

Как видно из рис. 3 и 4, при увеличении напряжения на кристалле центральная часть коноскопической картины сначала просветляется, а при дальнейшем увеличении напряжения затемняется: т.е. интенсивность света, проходящего через электрооптический модулятор в направлении оптической оси кристалла, зависит от управляющего напряжения.

Полученные графики позволяют оценить эффективность работы модулятора, которую можно характеризовать глубиной модуляции  $m$ :

$$m = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  — максимальная и минимальная интенсивность света.

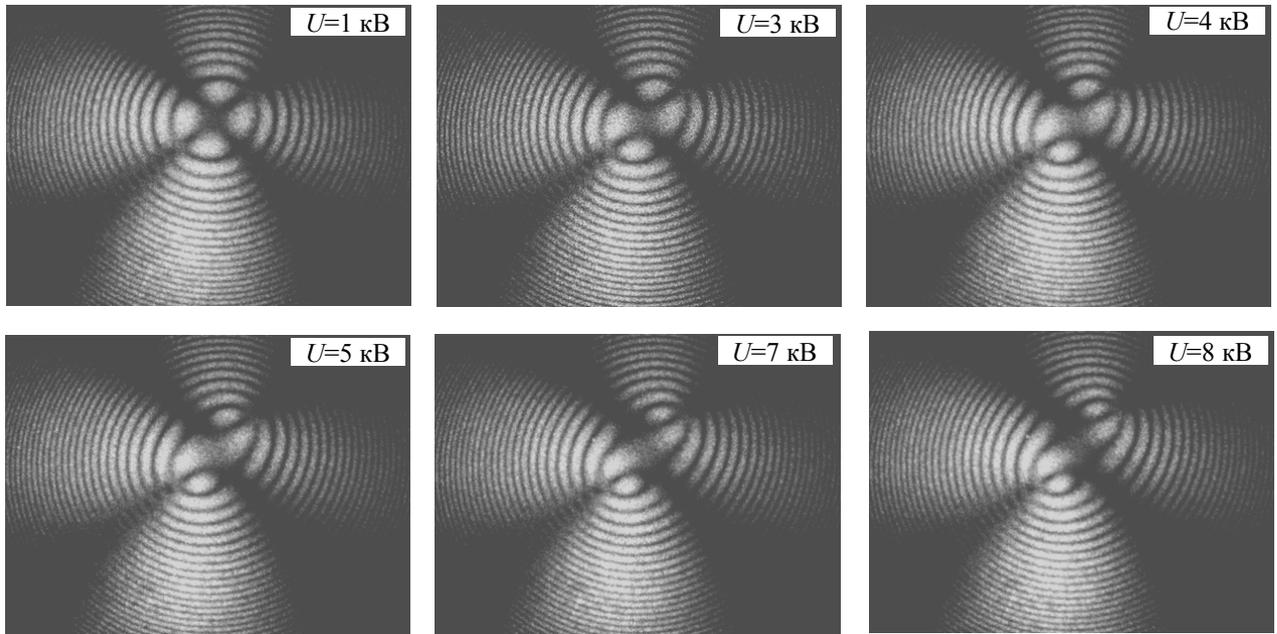


Рис. 3

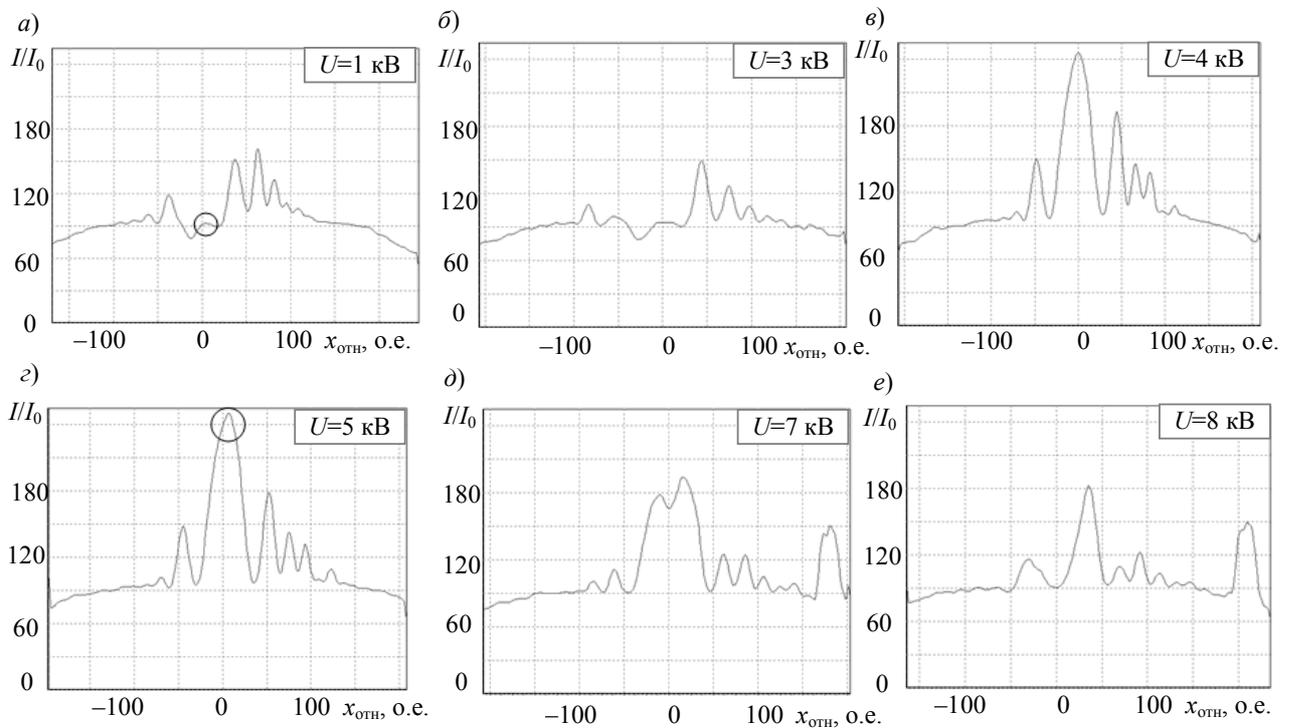


Рис. 4

По графикам (см. рис. 4, *a* и *z*) можно определить минимальную и максимальную интенсивность света, при этом глубина модуляции  $m = 0,84$ . Следовательно, данный электрооптический модулятор можно эффективно применять для амплитудной модуляции света.

Один из важных параметров модулятора — выходная интенсивность света:

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}, \quad \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{22} \frac{U}{d} L,$$

где  $I_0$  — входная интенсивность света;  $\Delta\varphi$  — разность фаз;  $\lambda = 0,63$  мкм — длина волны;  $n_0 = 2,29$ ;  $r_{22} = 3,4 \cdot 10^{-12}$  м/В [6];  $d = 13,4$  мм — толщина кристалла;  $L = 18,5$  мм — длина кристалла.

Еще одним важным параметром электрооптического модулятора является полуволновое напряжение  $U_{\lambda/2}$  [6], при котором достигается изменение коэффициента пропускания модулятора:

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda d}{2n_0^3 r_{22} L}.$$

Теоретически полученное значение составило 5588 В.

В современных волоконно-оптических линиях связи для передачи информации обычно используется полоса частот инфракрасного диапазона. Был произведен анализ поведения исследуемого электрооптического модулятора на длине волны 1,3 мкм. В данном случае полуволновое напряжение достаточно велико ( $U_{\lambda/2} = 12\,622$  В), поэтому следует перенести рабочую точку в область значений  $U_{\lambda/2} = 6311$  В. Для этого необходимо поставить четвертьволновую пластинку ( $\lambda/4$ ) перед модулирующим кристаллом или приложить постоянное напряжение смещения  $U_{см} = 6311$  В (рис. 5, а). Рабочее значение модулирующего напряжения составит 4 кВ. При этом глубина модуляции  $m = 0,89$ .

Другим способом уменьшить значение полуволнового напряжения, а значит, и управляющего модулирующего напряжения, является увеличение отношения  $L/d$ . В этом случае при той же длине кристалла ( $L = 13,4$  мм) и уменьшении толщины кристалла в 4 раза ( $d = 3,35$  мм) значение полуволнового напряжения составит 3155 В (рис. 5, б). Тогда при приложении напряжения смещения 1577 В значение управляющего переменного напряжения составит 1200 В при  $m = 0,9$ .

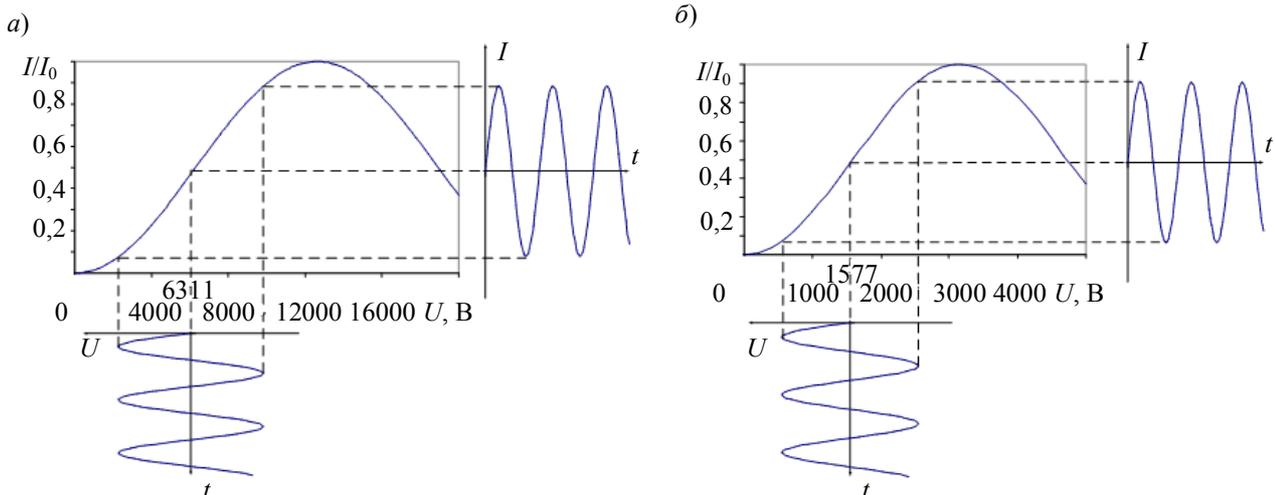


Рис. 5

Таким образом, на кристалле ниобата лития возможно создание электрооптического модулятора с хорошими характеристиками, пригодного для применения в системах передачи информации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лопатина П. С. Электрооптическая модуляция // Бюл. науч. сообщений ДВГУПС; Под ред. В. И. Строганова. Хабаровск: ДВГУПС, 2007. № 12. С. 51—54.
2. Лопатина П. С. Распределение электрического поля в кристаллах ниобата лития // Там же. С. 48—51.
3. Пикуль О. Ю., Алексеева Л. В., Повх И. В. и др. Особенности оптической системы для наблюдения коноскопических фигур больших размеров // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47, № 12. С. 53—55.
4. Криштон В. В., Литвинова М. Н., Сюй А. В. и др. Определение оптической неоднородности кристаллов по последовательности коноскопических фигур // Опт. журн. 2006. Т. 73, № 12. С. 84—85.
5. Криштон В. В., Ефременко В. Г., Литвинова М. Н. и др. Экспресс-анализ диффузных оптических изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 8. С. 21—23.
6. Блистанов А. А. Кристаллы квантовой нелинейной оптики. М.: МИСИС, 2007.

**Сведения об авторах**

- Полина Сергеевна Лопатина** — аспирант; Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра физики, Хабаровск; E-mail: fizika@festu.khv.ru
- Виктор Владимирович Криштон** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра физики, Хабаровск; E-mail: krishtop@list.ru

Рекомендована кафедрой  
физики

Поступила в редакцию  
23.01.09 г.

# SUMMARY

**P. 3—8.**

## **CLUSTER NUMBER ESTIMATION PROBLEM IN PARTITION METHODS**

The problem of cluster number estimation in analyzed set partition methods is considered. The set of well-known criteria designed for centroid methods are discussed: partition coefficient, partition entropy, and partition efficiency. Two new criteria are proposed: modified partition coefficient (for centroid methods) and partition quality (for non-centroid method).

**Keywords:** clustering, partition methods, fuzzy equivalence relation, solution quality, quality criterion, partition coefficient, partition entropy.

### *Data on authors*

- Sergey I. Elizarov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, Department of Computing Technique; E-mail: duplex@rambler.ru
- Michail S. Kupriyanov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, Department of Computing Technique; E-mail: Mikhail.kupriyanov@gmail.com

**P. 8—11.**

## **CREATION OF A COMMON INFORMATIONAL RESOURCE OF CORPORATE NETWORK IN SOCIAL ORGANIZATIONAL-TECHNICAL SYSTEM**

The problem of creation of a common informational resource of corporate network in social organizational-technical system is considered. Definition of common informational resource is given, and the resource core and composition structure are described. Function of the common resource is formulated, and technological basis of the resource, lines and the order of steps in its formation are discussed.

**Keywords:** common informational resource, automated control system, corporate network, social organizational-technical system.

### *Data on author*

- Sergey A. Alekseev* — Cand. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State Theatre Arts Academy; E-mail: ksgati@tart.spb.ru

**P. 11—16.**

## **MEDICAL DATA-MEASURING SYSTEM FOR FUNCTIONAL DIAGNOSTICS**

A portable medical data-measuring system (MDMS) designed for functional diagnostics of organs of human gastrointestinal tract is considered. Mathematical methods applied for processing of electrogastrogram, including wavelet signal analysis are described. It is emphasized that the relatively low-cost system provides a non-invasive examination and makes it possible to obtain operatively numerical values of medical indices; it is applicable also for analysis of nonstationary processes.

**Keywords:** biomedical signals, gastric waves, spectral analysis, dominant frequency, electrogastrography, wavelet.

*Data on authors*

- Sergey F. Svinyin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Automation of Scientific Research; E-mail: svinyins@mail.ru
- Ludmila E. Khaymina* — Cand. Ped. Sci.; Lomonosov Pomor State University, Department of Mathematical Analysis, Arkhangelsk; E-mail: jacques@atnet.ru
- Ekaterina A. Latukhina* — Post-Graduate Student; St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences, Laboratory of Automation of Scientific Research; E-mail: lea2003@atnet.ru
- Alexander I. Popov* — Post-Graduate Student; Lomonosov Pomor State University, Department of Applied Mathematics, Arkhangelsk; E-mail: aippv@mail.ru

**P. 17—20.****ESTIMATION OF TOLERANCES ON COMPONENTS IN TECHNICAL REALIZATION OF CONTROL LAWS**

Program realization of the problem of tolerances estimation of tolerances on elements of automated control system is considered. The problem reduces to calculation of upper and low limits for coefficients of interval polynomial attendant with a given Hurwitz characteristic polynomial describing a closed-loop control system with a regulator. Solution to the problem is obtained with the use of Hermite – Biller polynomials and Vieta formulas in an alternative form.

**Keywords:** control law, dynamic system, triangular matrix.

*Data on author*

- Artiom S. Kondrashov* — Post-Graduate Student; Saratov State Technical University, Department of Technical Cybernetics and Informatics; E-mail: kondrashovas@gmail.com

**P. 21—25.****OPTIMIZATION OF FLYING VEHICLE DYNAMICS WITH DIFFERENT CRITERIA**

The problem of optimal control over a flying vehicle regarded as a hard body is considered. Flying object dynamics is described by Euler and Poisson equations. The optimal solution to the problem is obtained on the base of Pontriagin principle with Lagrange criterion as a goal functional.

**Keywords:** flying vehicle, optimal control, Pontriagin principle.

*Data on author*

- Anton A. Alexandrov* — Post-Graduate Student; Ustinov Baltic State Technical University “Voenmech”, Department of Information Processing Systems and Control, St. Petersburg; E-mail: antonhill@mail.ru

**P. 26—31.****AN INTELLECTUAL AGENT FOR SEMANTIC WEB**

The paper describes a problem of knowledge retrieval from Semantic Web and implementation the universal intellectual agent for Semantic Web. Some requirements and principles of intellectual agent are discussed and approaches to shrink combinatorial complexity of retrieval task are proposed.

**Keywords:** semantic web, intellectual agent.

*Data on author*

- Igor A. Bessmertny* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computing Technique; E-mail: igor\_bessmertny@hotmail.com

## P. 32—39.

**A METHOD TO REVEAL UNDECLARED PERFORMANCE CAPABILITIES AND VALUES “DON’T CARE” OF A CALCULATION PROCEDURE**

Verification of calculation processes based on graph-analytic models governed by partially determined Boolean functions is considered. The problem is analyzed of retrieval of undeclared capabilities and open-circuits resulting from *don't care* values with the use of Boolean control graph and cubical covering. Results are presented of cover construction for a Boolean graph and verification of *don't care* values in the form of a cover for conjunction of identically zero relations-inequalities.

**Keywords:** calculation procedure, undeclared performance capabilities, open-circuit, graph-analytic model.

*Data on authors*

- Oleg F. Nemolochnov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Informatics and Applied Mathematics
- Anatoly G. Zykov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Informatics and Applied Mathematics;  
E-mail: zykov\_a\_g@mail.ru
- Viacheslav S. Kulagin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Electronics
- Leonid G. Osovetsky* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Safety Information Technologies
- Vladimir I. Polyakov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computing Technique;  
E-mail: v\_i\_polyakov@mail.ru
- Andrey V. Sukhanov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Safety Information Technologies

## P. 40—43.

**ALGORITHMS OF PARAMETRICAL IDENTIFICATION OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS PROTECTED AGAINST HINDRANCE**

A new algorithm of parametrical identification of electromechanical system with known structure is proposed. A generalized mathematical model of the electromechanical system is constructed which allows for identification of partially observable systems based on test results perturbed by noise.

**Keywords:** parametrical identification, electromechanical system, mathematical model.

*Data on authors*

- Alexander M. Vodovozov* — Cand. Techn. Sci.; Vologda State Technical University, Department of Control and Computation Systems; E-mail: amv@vstu.edu.ru
- Alexander S. Elyukov* — Student; Vologda State Technical University, Department of Control and Computation Systems; E-mail: aelyukov@yandex.ru

## P. 43—49.

**TECHNIQUE FOR MEASURING THE TIME CONSTANT OF ELECTRIC DRIVE**

A method is proposed for estimation of electromechanical time constant of an electric drive with the use of mathematical analysis of physical processes in the drive starting mode. The method is based on a one-to-one correspondence between the time for which reaction of non-periodic component reaches its extremum, and time constants of the electric drive and its non-periodic component. A special device realizing the developed method for a DC electric drive is described.

**Keywords:** electric drive, electromechanical time constant, non-periodic component, transfer function.

*Konstantin A. Ankudinov*

**Data on authors**

— Cand. Techn. Sci.; Tula Artillery Engineering Institute, Department of Radioelectric Devices and Control Systems; E-mail: aai\_tula@mail.ru

*Alexander I. Ankudinov*

— Cand. Techn. Sci.; Tula Artillery Engineering Institute; Head of Military-Technical Information Office

*Nikolai S. Akinshin*

— Dr. Techn. Sci., Professor; Tula Artillery Engineering Institute

*Oleg A. Glagolev*

— Cand. Techn. Sci.; Tula Artillery Engineering Institute, Department of Radar-Tracking Detection

*Aleksey V. Emelyanov*

— Cand. Techn. Sci.; Tula Artillery Engineering Institute, Department of Special Electric Equipment and Systems of Automatic Control

*Vladimir V. Manuilov*

— Post-Graduate Student; Tula Artillery Engineering Institute, Department of Radioelectric Devices and Control Systems

**P. 50—53.**

**CIRCULAR GENERATOR ON PROGRAMMABLE LOGICAL INTEGRATED CHIP**

Principles of construction and design features of circular pulsed generators on the base of programmable logical integrated chip are considered. Technological scattering of pulse repetition rate for the generators is estimated, thermal stability and sensitivity of the rate to variations of supplied power are evaluated.

**Keywords:** circular generator, pulse repetition rate, time delay, delay element, programmable logical integrated chip.

**Data on authors**

*Aleksey V. Medvedev*

— Post-Graduate Student; Penza State Technological Academy, Department of Computers and Systems; E-mail: mav@pgta.ac.ru

*Valery A. Chulkov*

— Cand. Techn. Sci.; Penza State Technological Academy, Department of Computers and Systems; E-mail: chu@pgta.ac.ru

**P. 54—60.**

**PARAMETERS OF SPHERICALLY SYMMETRIC DISTRIBUTION OF REFRACTIVE INDEX IN SPHERICAL AND CARTESIAN COORDINATE SYSTEMS**

A description is given for a spherically symmetric distribution of refractive index in both spherical and Cartesian coordinate systems. Transformation of polynomial radial dependence of refractive index into Cartesian coordinate system is shown to enable calculations of aberration coefficients and computer modeling of optical elements with spherically symmetric gradient of refraction index.

**Keywords:** spherical coordinate system, Cartesian coordinate system, refraction index, spherically symmetric gradient of refraction index, aberration coefficients.

**Data on author**

*Alexander L. Sushkov*

— Cand. Techn. Sci.; Bauman Moscow State Technical University, Department of Opto-Electronic Scientific Instruments; E-mail: ale-sushkov@yandex.ru

**P. 61—67.****APPLICATION OF INTEGRATED CRITERIA OF EFFICIENCY IN LASERS DEVELOPMENT AND EXPLOITATION**

Application of integrated criteria of efficiency in lasers development and exploitation is considered. Laser beam intensity in the far-field region is proposed as one of the criteria. Practical examples of laser system optimization with the use of this criterion of efficiency are presented: structural-parametric optimization of unstable resonator for a high-power gas-dynamic laser and choice of optimal operating conditions for a pulsed solid-state laser.

**Keywords:** criteria of efficiency, unstable resonator, far-field region, angle of divergence, gas-dynamic laser, solid-state laser.

***Data on author***

**Sergey Yu. Strakhov** — Cand. Phis.-Math. Sci.; Ustinov Baltic State Technical University “Voenmech”, Department of Laser Technique; E-mail: Strakhov\_s@mail.ru

**P. 67—71.****ELECTRO-OPTICAL MODULATOR FOR FIBER OPTIC COMMUNICATION LINE**

Electro-optical properties of lithium niobate crystal are studied experimentally. The experimental set-up includes an electro-optical modulator based on Pockels effect. The modulator characteristics are examined with the use of conoscopic figures; basic characteristics for wavelengths of 0,85 and 1,3  $\mu\text{m}$  are presented.

**Keywords:** electro-optical modulator, Pockels effect, lithium niobate crystal, conoscopic figure, fiber optic communication line.

***Data on authors***

**Polina S. Lopatina** — Post-Graduate Student; Far-East State University of Means of Communication, Department of Physics, Khabarovsk; E-mail: fizika@festu.khv.ru

**Viktor V. Krishtop** — Cand. Phis.-Math. Sci.; Far-East State University of Means of Communication, Department of Physics, Khabarovsk; E-mail: krishtop@list.ru

# УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2009 Г.

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ</b>		
Алексеев С. А.	Технология эргономического обеспечения проектирования автоматизированного рабочего места интегрированной АСУ	9
Алексеев С. А.	Формирование общего информационного ресурса в корпоративной сети социальной организационно-технической системы	12
Балхарет А. А., Падерно П. И.	Оценка напряженности деятельности оператора на основе автоматизированного опроса	7
Барбашов Е. А., Демин А. В., Кулагин В. С., Начкебия А. Б.	Имитационное моделирование при исследовании временных характеристик дискретных систем	3
Гладышев К. К., Шульгин Е. А.	Система автоматического распознавания речевых команд	3
Добриков В. А., Авдеев В. А., Гаврилов Д. А.	Определение траектории авиационного носителя радиолокатора с синтезированной апертурой	1
Довгоброд Г. М., Клячко Л. М., Рогожников А. В.	Использование параметрической аппроксимации при планировании траекторий движения аппаратов	9
Доможиров В. Т.	Метод упорядочения сочетаний объектов в задачах структурной динамики технических систем	7
Елизаров С. И., Куприянов М. С.	Проблема определения количества кластеров при использовании методов разбиения	12
Ипатов Ю. А., Кревецкий А. В.	Алгоритм локализации границ текстурных участков древесины на их цифровых изображениях	7
Кириллов А. Н.	Динамические системы с переменной структурой и размерностью	3
Краснов Ю. С.	Метод оптимизации программы навигационных измерений на борту космического аппарата	9
Лужков Ю. В.	Метод адаптивного скалярного квантования в схемах необратимого сжатия изображений	3
Манойлов В. В., Солодовников А. И., Заруцкий И. В.	Использование системы базисных функций для выявления наличия примесей в изотопном масс-спектре трансурановых элементов	7

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Мусалимов В. М., Дик О. Е., Тюрин А. Е.	Параметры действия энергетического спектра вейвлет-преобразований	5
Петрова Е. Н., Коротков К. Г., Орлов Д. В., Короткова А. К.	Принципы построения и структура автоматизированного программно-аппаратного комплекса оценки состояния здоровья	5
Пименов В. И.	Алгоритмическое обеспечение инструментального комплекса для формирования знаний о технологических процессах	1
Потапов А. С., Гуров И. П., Аверкин А. Н.	Анализ модели клеток зрительной системы на основе принципа минимизации репрезентационной длины описания изображений	9
Свиньин С. Ф., Хаймина Л. Э., Латухина Е. А., Попов А. И.	Медицинская информационно-измерительная система функциональной диагностики	12
Семёнова М. А., Семёнов В. А.	Метод автоматической фильтрации при борьбе со „спамом“	9
Соколов С. В., Кучеренко П. А.	Решение задачи нелинейной параметрической идентификации стохастических объектов с использованием критерия минимума вероятности ошибки оценивания	3
Тулупьев А. Л.	Оценка чувствительности результата априорного логико-вероятностного вывода в интеллектуальных информационных системах	9
Тулупьев А. Л.	Преобразование ациклических байесовских сетей доверия в алгебраические байесовские сети	3
Тулупьев А. Л.	Согласованность данных и оценка вероятности альтернатив в цикле стохастических предпочтений	7
Шишкин И. Ф., Сергушев А. Г.	К вопросу об эффективности приборов поиска объектов	5

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Александров А. А.	Оптимизация динамики летательного аппарата по различным критериям	12
Кабанов Д. С.	Оптимальное управление ядерным реактором с учетом случайных возмущений	5
Кабанов С. А., Петухова Е. С.	Оптимальное управление ветроэнергетической установкой колебательного типа	3
Кожевникова Л. В., Ушаков А. В.	Исследование динамических систем с перемножением переменных на основе кронекеровских матричных структур	1
Кондрашов А. С.	Определение допусков на элементы САУ при технической реализации законов управления	12

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Коршунов А. И.	Предельная непрерывная модель системы с высокочастотным периодическим изменением структуры	9
Кудинов М. Г., Силантьев С. Б., Степовой А. В.	Управление относительным движением космического аппарата при наблюдении орбитальных объектов пассивными средствами	7
Лихолетов Е. Д., Ушаков А. В., Цвентарный А. Ю.	Анализ интервальных перекрестных связей в динамических системах класса „двумерный вход — выход“ с квазиоднотипными каналами	9
Лихолетов Е. Д., Ушаков А. В., Цвентарный А. Ю.	Анализ перекрестных связей в динамических системах класса „двумерный вход — выход“ с однотипными каналами	7
Мироновский Л. А., Шинтяков Д. В.	Связь ганкелевых сингулярных чисел линейной системы с ее частотными характеристиками	1
Семенихин В. К., Кириченко Д. В.	Автономное управление малым космическим аппаратом при сближении с обслуживаемым орбитальным объектом	7
Сизова А. А.	Метод построения областей достижимости для нелинейных управляемых систем	7
Фуртат И. Б., Цыкунов А. М.	Адаптивное управление объектами с неопределенностью знака коэффициента передачи	5
<b>ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА</b>		
Ананьев М. Ю., Гортинская Л. В., Костин А. А., Молдовян Н. А.	Реализация протокола коллективной подписи на основе стандартов ЭЦП	1
Бессмертный И. А.	Методы поиска информации с использованием интеллектуального агента	12
Будько М. Ю.	Повышение безопасности работы компьютерных сетей на основе анализа потоков данных	5
Бураков В. В.	Формальный базис для оценки качества программных средств	1
Гирик А. В.	Применение методов многокритериального прогнозирования в сетевых системах обнаружения вторжений	5
Голицына Т. Д.	Интеграция систем управления данными об изделии и систем автоматизированного проектирования: от частных решений к глобальной стратегии	3
Немолочнов О. Ф., Зыков А. Г., Кулагин В. С., Осовецкий Л. Г., Поляков В. И., Суханов А. В.	Метод обнаружения недеklarированных возможностей и значений <i>don't care</i> вычислительного процесса	12
Тазетдинов А. Д.	Технология построения обучающих диалогов в компьютерных системах репетиторского типа	3

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ</b>		
Зайцев Д. Л., Агафонов В. М., Шабалина А. С.	Шумовые характеристики молекулярно-электронных измерителей угловых параметров движения	7
Николаев С. Г.	Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем	7
<b>ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ</b>		
Белоусов А. А., Явленский А. К., Севастьянов А. А., Волков А. С.	Тепловизионная и виброакустическая диагностика электромеханических устройств	1
<b>ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА</b>		
Анкудинов К. А., Анкудинов А. И., Акиншин Н. С., Глаголев О. А., Емельянов А. В., Мануйлов В. В.	Способ измерения постоянной времени электропривода	12
Баев А. П., Гончаренко М. Р., Исаков А. С.	Силовой источник питания четырехквadrантного электропривода	1
Водовозов А. М., Елюков А. С.	Помехозащищенные алгоритмы параметрической идентификации электромеханических систем	12
Зиатдинов С. И.	Алгоритм дискретной фильтрации с промежуточным сглаживанием отсчетов входного сигнала	9
Зиатдинов С. И.	Интерполирование функции на основе дискретного преобразования Фурье	1
Зиатдинов С. И.	Оценка нелинейных искажений сигнала, вносимых электронным усилителем	5
Медведев А. В., Чулков В. А.	Кольцевые генераторы импульсов на ПЛИС	12
Сенкевич Ю. И.	Автоматизация медицинских наблюдений в полярных зонах	5
Титов А. А.	Защита полосовых усилителей мощности от перегрузок и модуляция амплитуды мощных сигналов	9
Чулков В. А.	Устройства синхронизации с элементами фазовой интерполяции	9
Чулков В. А., Медведев А. В.	Генератор импульсов с фазовым дрожанием	1
Андреев Л. Н., Комарова Ю. А.	Аберрационные свойства отражающих поверхностей второго порядка	3

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ</b>		
Артюхина Н. К., Богатко А. В.	Двухзеркальный объектив с четырьмя отражениями	1
Гримм В. А.	Определение параметров структурированных поверхностей	1
Козлов В. Л.	Повышение точности рециркуляционного дальномера	9
Козлов В. Л.	Спектроанализатор доплеровских сигналов	3
Лебедько Е. Г., Нгуен Ву Тунг	Погрешность измерения радиальной протяженности поверхности при ее моноимпульсном облучении	5
Лопатина П. С., Криштоп В. В.	Электрооптический модулятор для волоконно-оптических линий связи	12
Михеев Г. М., Зонов Р. Г., Образцов А. Н., Стяпшин В. М.	Влияние прозрачного покрытия на оптоэлектрический сигнал в на- нографитных пленках	3
Нгуен Куанг Хиеп, Якушенкова Т. И.	Расчет и исследование двухзеркальных композиций оптических систем	3
Новиков А. А., Храмцовский И. А., Иванов В. Ю., Федоров И. С., Туркбоев А.	Эллипсометрия неоднородных поверхностных слоев анизотропных оптических элементов	1
Семидетнов Н. В.	Моделирование сигнала лазерных анемометров при измерениях скоростей и размеров частиц в двухфазных потоках	7
Смирнов В. Д., Егельский И. Д., Бендюговский А. Е.	Фоторегистрирующие устройства для воспроизведения информации космической метеорологической аппаратуры третьего поколения	3
Смирнов В. Д., Кнороз И. В., Герсанова С. Е.	Чувствительность оптико-электронных приборов при малом контрасте объекта к окружающему фону	5
Смирнов В. Д., Кнороз И. В., Герсанова С. Е., Бендюговский А. Е.	Тестирование оптико-электронных бортовых космических систем наблюдения	7
Страхов С. Ю.	Применение комплексных критериев эффективности при разработке и эксплуатации лазеров	12
Сушков А. Л.	Параметры сфероконцентрического распределения показателя преломления в сферической и прямоугольной системах координат	12

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Сюй А. В., Рудой К. А., Строганов В. И., Криштоп В. В.	Эволюция коноскопических картин при изменении положения оптической оси кристаллической пластинки	1
Торшина И. П., Якушенков Ю. Г.	Оценка адекватности компьютерной модели оптико-электронной системы ее заданным свойствам	9

### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Алексеев В. П., Карабан В. М.	Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на точностные параметры гибридно-пленочного микротермостата	7
Волков Д. П., Кулиева Л. А., Успенская М. В., Токарев А. В.	Исследование теплопроводности полимерных композиционных материалов	1
Марков О. И.	Математическое моделирование работы низкотемпературных охлаждающих термоэлементов	5
Меркухин Е. Н.	Использование графовых моделей пространства допустимых решений в задаче размещения электронных элементов	5
Митяков А. В.	Градиентные датчики теплового потока в физическом и промышленном эксперименте	7
Платунов Е. С., Баранов И. В., Платунов А. Е.	Теплофизическая лаборатория низких температур	5
Тымкул В. М., Шелковой Д. С.	Методика расчета чувствительности пирометра при воздействии помех неоднородного фона	1

### ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Беляев С. Н.	Технологические особенности выбора материалов и методов напыления узлов гироприборов	3
Бесогонов В. В., Скворцова И. Н.	Уменьшение шероховатости поверхности ситалловой подложки до наноразмерных значений	9
Карагодин В. В., Вишняков Е. П.	Определение оптимального периода диагностирования электрооборудования	9
Махов В. Е., Палаев А. Г., Потапов А. И.	Автоматизация контроля качества сварных швов с использованием ультразвуковой технологии	5
Скворцов А. М., Фам Куанг Тунг	Структура нанокластеров кремния в системе кремний — диоксид кремния	3
Скворцов А. М., Чуйко В. А., Ле Зуй Туан, Фам Куанг Тунг	Формирование регулярного массива нанокластеров кремния методом проекционного лазерного облучения	5

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>НОВЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b>		
Бояшова С. А.	Метрологический подход к понятию профессиональной компетентности специалиста	9
<b>ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК</b>		
<b>МАЛЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ</b>		
Аверьянов А. В.	Аналитический метод расчета движения малого космического аппарата, связанного с базовым космическим аппаратом	4
Аверьянов А. В.	Оценивание надежности автоматизированных систем управления подготовкой и проведением пуска космического аппарата	4
Барановский А. М., Белозеров В. А., Опрышко Д. И.	Комбинированная модель процесса оценивания достоверности контроля технического состояния космических аппаратов в условиях неопределенности	4
Барановский А. М., Привалов А. Е.	Система контроля и диагностирования бортового оборудования малого космического аппарата	4
Басыров А. Г., Гончаренко В. А., Забузов В. С., Кремез Г. В., Эсаулов К. А.	Повышение устойчивости функционирования бортовых вычислительных систем по результатам космических экспериментов	4
Горбулин В. И., Панченко В. В., Радионых Н. В.	Технико-экономический подход к выбору системы малых космических аппаратов	4
Каргу Д. Л., Кремез Г. В., Минаков Е. П., Николаев П. В., Федоров С. А.	Малогабаритный бортовой комплекс управления космическим аппаратом	4
Кириченко Д. В., Глушенко А. А., Маслов К. К., Упитис К. И.	Моделирующий стенд для испытаний бортовых оптико-электронных систем малых космических аппаратов с использованием средств имитации фоноцелевой обстановки	4
Ксендзук А. В., Фатеев В. Ф., Попов С. А.	Метод обработки сигналов в космических многопозиционных радиолокационных системах с синтезом апертуры антенны	4
Мальцев Г. Н., Кунгурцев В. В., Козинов И. А.	Дистанционное зондирование Земли на основе кластера малых космических аппаратов многоспектрального наблюдения	4
Минаков Е. П., Чичкова Е. Ф.	Мониторинг чрезвычайных ситуаций с использованием дистанционного зондирования Земли	4

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Сахно И. В., Ткачев Е. А., Гаврилов Д. А., Успенский К. К.	Малый космический аппарат обзора морской поверхности с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем	4
Фатеев В. Ф., Каргу Д. Л.	Перспективная сеть передачи данных для локальной группировки малых космических аппаратов	4
Фатеев В. Ф., Лагуткин В. Н., Лукьянов А. П., Подкорытов Е. Н., Слынько Ю. В., Старостенко А. М.	Моделирование входной информации оптической системы малых космических аппаратов	4
Фатеев В. Ф., Лагуткин В. Н., Слынько Ю. В.	Использование малых космических аппаратов со спектроскопическими приборами для мониторинга газообразных выбросов в атмосфере	4

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК****АВИОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ  
В ТЕХНИЧЕСКИХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

Алексеев Р. А., Котельников Ю. П.	Формирование задающих воздействий, обеспечивающих движение двуногого шагающего робота в сагиттальной плоскости	11
Андреев Л. В., Богословский С. В., Видин Б. В., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Парамонов П. П., Сабо Ю. И.	Формализация вектора наблюдений измерительного комплекса беспилотных летательных аппаратов	11
Андреев Л. В., Богословский С. В., Видин Б. В., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Парамонов П. П., Шек-Иовсеянц Р. А.	Межсамолетная навигация группы летательных аппаратов	11
Арановский С. В., Бардов В. М., Бобцов А. А., Капитонов А. А., Пыркин А. А.	Синтез наблюдателя в условиях возмущения процесса измерения выходной переменной	11
Бирюков Д. С., Слита О. В., Ушаков А. В.	Оценка затрат на управление в задаче обеспечения желаемой структуры мод и их робастности	11

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Бобцов А. А., Николаев Н. А.	Использование линейной версии метода последовательного компенсатора для стабилизации систем со степенными статическими нелинейностями	11
Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В., Обертов Д. Е.	Пьезопривод на основе тонкопленочных пьезоактюаторов	11
Бойков В. И., Быстров С. В., Коровьяков А. Н., Салмыгин И. П.	Экспериментальное исследование характеристик пьезоприводов нового поколения	11
Бушуев А. Б., Исаева Е. Г., Морозов С. Н., Чепинский С. А.	Управление траекторным движением многоканальных динамических систем	11
Григорьев В. В., Козис Д. В., Коровьяков А. Н.	Принципы построения пилотажно-навигационных комплексов на основе интегральной модульной авионики	11
Григорьев В. В., Мансурова О. К., Мотылькова М. М., Рабьш Е. Ю., Рюхин В. Ю., Черевко Н. А.	Исследование систем пространственного слежения с периодическими коэффициентами	11
Дударенко Н. А., Нуйя-Осищева О. С., Ушаков А. В., Филиппов М. И.	Управление одноканальными объектами с помощью скалярного двоичного канала связи	11
Дударенко Н. А., Полякова М. В., Ушаков А. В.	Вырождение производственной динамической системы, вызванное усталостью ее антропокомпонентов	11
Дударенко Н. А., Полякова М. В., Ушаков А. В.	Конструирование вещественнозначной критериальной матрицы для одноканальной системы	11
Ушаков А. В., Цвентарный А. Ю.	Модальное управление динамическими одноканальными объектами при сложном экзогенном стохастическом воздействии	11
Ушаков А. В., Яицкая Е. С.	Помехозащитное декодирование систематических кодов	11

## СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Андрианов Д. Е., Садыков С. С., Фролов В. В.	Формальное представление характеристик пространственно-распределенных объектов	2
----------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------	---

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Бехтин Ю. С., Соляков В. Н., Титов Д. В.	Сопряжение многоэлементного фотоприемного устройства с персональным компьютером измерительного стенда	2
Борзов Д. Б.	Размещение параллельных подпрограмм в мультимикроконтроллерах с учетом отказов	2
Борзов Д. Б., Дюбрюкс С. А., Титов В. С.	Метод объединения и разделения циклических участков последовательных наследуемых программ	2
Ватугин Э. И., Зотов И. В., Титов В. С.	Выявление изоморфных вхождений $R$ -выражений при построении параллельных алгоритмов логического управления	2
Гордиенко В. В., Довгаль В. М., Пузына Р. А.	Распознавание изображений с использованием хаотической трансформации эталонов и объектов	2
Гостев И. М., Подгорбунский А. Г.	Распределение потоков графической информации в системах распознавания образов в реальном масштабе времени	2
Гридин В. Н., Бугаенко Е. И.	Метод автоматического формирования панорамных изображений на основе аппарата нечеткой логики	2
Мирошниченко С. Ю., Титов В. С.	Параллельно-конвейерное устройство для векторизации аэрокосмических изображений земной поверхности	2
Огнев А. В., Типикин А. П.	Алгоритм инвариантного распознавания отпечатков пальцев по ключевым точкам	2
Садыков С. С., Орлов А. А., Ермаков А. А.	Методика обработки линейчатых образов на дефектоскопических снимках	2
Стрелкова А. Н., Труфанов М. И., Степченко А. А.	Математическая модель восстановления эндоскопических изображений	2
Титенко Е. А.	Метод реконфигурации операционной части мультипроцессора структурного распознавания образов	2
Титов Д. В., Ширабакина Т. А.	Модуль цифровой коррекции дисторсии изображения	2
Труфанов М. И.	Распознающие оптико-электронные устройства медицинской экспресс-диагностики	2

## СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ФОТОЭЛЕКТРОНИКИ  
И СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Батомункуев Ю. Ц., Мещеряков Н. А.	Внеосевые объемные голограммные элементы для ближнего инфракрасного диапазона спектра	6
---------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------	---

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Борзов С. М., Козик В. И., Потатуркин О. И.	Коррекция тепловизионных изображений на основе статистической обработки реальных данных	6
Голицын А. В.	Повышение эффективности лазерного локатора оптических систем	6
Голицын А. В., Журавлев П. В., Журов Г. Е., Корякин А. В., Чихонадских А. П., Шлишевский В. Б., Яшина Т. В.	Псевдобинокулярный многоканальный прибор обнаружения потенциальных угроз	6
Донин В. И.	Высокоэффективный источник непрерывного дальнего вакуумного ультрафиолетового излучения для обработки полупроводниковых материалов	6
Егоренко М. П., Ефремов В. С.	Хроматические свойства зеркала Манжена в нескольких диапазонах спектра	6
Козик В. И., Нежевенко Е. С.	Калибровка телевизионных датчиков при расположении измеряемых объектов в труднодоступных местах	6
Мордвин Н. Н., Попов Г. Н.	Концепция построения оптико-электронных приборов наблюдения универсального назначения	6
Носков М. Ф., Шлишевский В. Б.	Псевдоцветной окуляр для приборов ночного видения	6
Олейник С. В., Хацевич Т. Н.	Исследование базовых двухлинзовых компонентов светосильных объективов, предназначенных для работы с современными электронно-оптическими преобразователями	6
Олейник С. В., Хацевич Т. Н.	Способ построения оптической системы с дискретным изменением фокусного расстояния	6
Чесноков Д. В., Чесноков В. В.	Лазерное формирование наноразмерных структур	6
Чесноков В. В., Чесноков Д. В., Никулин Д. М.	Интерференционные светофильтры с перестраиваемой полосой пропускания	6
Швец В. А., Рыхлицкий С. В., Спесивцев Е. В., Михайлов Н. Н.	Эллипсометрический контроль параметров выращиваемых наноразмерных гетероструктур	6

## СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

Белоусов Ю. И., Иванов Д. В.	Учет характеристик флуктуаций фонового излучения пригоризонтной области моря в алгоритмах обработки сигналов инфракрасных приборов	8
---------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Белоусов Ю. И., Фисенко В. Т.	Особенности алгоритмов цифровой обработки изображений в оптико-электронных системах нового поколения	8
Кудрявцев А. С.	Система отображения и наблюдения для тренажерного комплекса	8
Куприянов А. С.	Методы обработки и анализа пупиллограмм	8
Малов А. М., Шереметьева Т. А., Филиппов Г. Н., Филиппов В. Г.	Компьютерная обработка биомедицинских многоканальных изображений с использованием визуализации меры сходства с эталоном	8
Можейко В. И., Обухова Н. А., Тимофеев Б. С., Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю.	Телевизионные методы сопровождения объектов в сложных условиях наблюдения	8
Можейко В. И., Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю.	Адаптивный метод ранговой многоканальной фильтрации для подавления шумов в цветных изображениях	8
Сергунов А. А.	Методы коррекции неравномерности чувствительности инфракрасных матричных фотоприемников	8
Смирнов М. З., Пушкарева А. Е.	Особенности использования уравнения теплопроводности для моделирования воздействия лазерного излучения на кожу	8
Фисенко В. Т., Вилесов Л. Д., Можейко В. И., Фисенко Т. Ю.	Обнаружение маневра объекта и прогнозирование его траектории в телевизионной следящей системе	8
Шереметьева Т. А., Малов А. М., Филиппов Г. Н.	Обработка изображений и морфометрические измерения объектов в микроскопии	8
Шмидт В. К., Галикеев Г. Б., Горбачевич Ф. Ф., Кудрявцев А. С.	Моделирование и визуализация локальных областей на поверхности Земли при наблюдении со спутника	8

### СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

#### ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Бухановский А. В., Ковальчук С. В., Марьин С. В.	Интеллектуальные программные комплексы компьютерного моделирования сложных систем: концепция, архитектура и примеры реализации	10
Гергель А. В.	Адаптивные параллельные вычисления для многомерной многоэкстремальной оптимизации	10

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Григина Е. А., Золотарев О. А., Пименов И. А., Бухановский А. В.	Интеллектуальные технологии проектирования и разработки массовых мобильных сервисов	10
Демьянович Ю. К.	Проблемы распараллеливания в некоторых локальных задачах	10
Нечаев Ю. И.	Нелинейные эффекты в системах управления сложными динамическими объектами	10
Рабинович П. Д.	Интеллектуальное взаимодействие в распределенной информационной среде	10
Стронгин Р. Г., Гергель В. П., Баркалов К. А.	Параллельные методы решения задач глобальной оптимизации	10
Холкин В. Ю.	Модель возникновения $1/f$ -шума как результат пуассоновского процесса	10
Шальто А. А., Мандриков Е. А., Чеботарева Ю. К.	Автоматное программирование и параллельные вычисления	10
Штейнберг Б. Я.	Блочно-рекурсивное параллельное перемножение матриц	10
Якобовский М. В.	Вычислительный эксперимент на многопроцессорных системах: алгоритмы и инструменты	10
<b>КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ</b>		
Бояшова С. А.	Метрологическая основа построения автоматизированной системы тестирования	5